

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-084005

(43)Date of publication of 19.03.2003  
application :

---

(51)Int.Cl. G01P 5/20

G01P 13/00

---

(21)Application 2001-28050 (71)Applicant TOKYO ELECTRIC POWER  
number : 8 : CO INC:THE

KEIO GIJUKU

(22)Date of filing : 14.09.2001 (72)Inventor : MORI HARUTSUGU

TEZUKA HIDEAKI

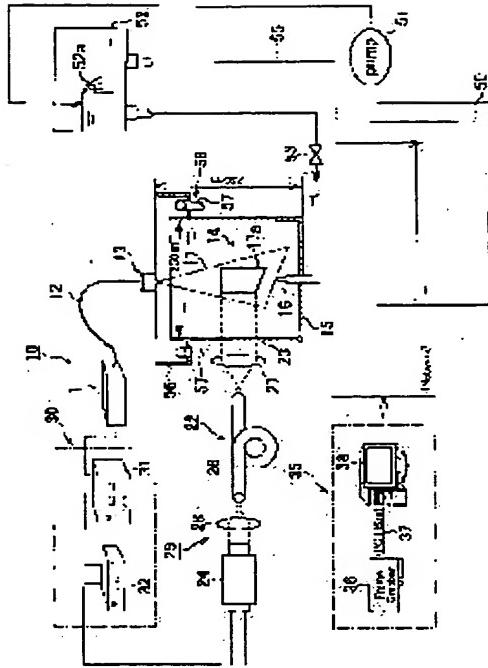
HISHIDA KOICHI

MAEDA MASANOBU

---

(54) SYSTEM AND METHOD FOR MEASURING FLUID FLOW

BEST AVAILABLE COPY



(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a fluid flow measuring technology allowing the accurate measurement of fluid flow in a complicated flow field from a remote place.

SOLUTION: The system for measuring fluid flow comprises: a laser oscillator 11; a laser sheet forming scanning optical system 13

for irradiating the fluid flow field 14 with laser beams oscillated from the oscillator 11, in a sheet shape; an image pickup means 29 for picking up a two-dimensional particle trace image on a laser sheet 17; a timing control means 30 for taking timing to synchronously drive the laser oscillator 11 and the image pickup means 29; and an image processing means 35 for processing the picked-up particle trace image. The image processing means 35 compares and analyzes the luminance pattern distribution of the particle images at two different times to measure the moving direction and distance of individual particles, thus measuring fluid flow and flow velocity distribution in the fluid flow field.

**LEGAL STATUS**

[Date of request for examination] 10.11.2004

[Date of sending the examiner's  
decision of rejection]

[Kind of final disposal of application  
other than the examiner's decision of  
rejection or application converted  
registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3685256

[Date of registration] 10.06.2005

[Number of appeal against examiner's  
decision of rejection]

[Date of requesting appeal against  
examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

\* NOTICES \*

JPO and NCIPI are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
  2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.
  3. In the drawings, any words are not translated.
- 

## CLAIMS

---

### [Claim(s)]

[Claim 1] The laser oscillation equipment which oscillates a laser beam, and the scan optical system for laser sheet formation which makes the oscillated laser beam supply to the floating in the hall of a fluid in the shape of a sheet, An image image pick-up means to picturize the two-dimensional particle track image on the laser sheet from this scan optical system, A timing control means to take and carry out synchronization actuation of said laser oscillation equipment and the image image pick-up means for timing, The brightness pattern of the particle track image of 2 time of day picturized with said image image pick-up means is compared and analyzed. The floating instrumentation system of the fluid characterized by constituting so that it may have an image-processing means to

measure each migration direction and movement magnitude of a particle and floating and the velocity distribution of a fluid may be measured from the movement magnitude of each particle by this image-processing means.

[Claim 2] Said image pick-up means is the floating instrumentation system of the fluid [ equipped with the picture transmission means which carries out optical transmission of the two-dimensional particle track image on the laser sheet from scan optical system, and an image pick-up means to picturize the two-dimensional particle track image by which optical transmission was carried out ] according to claim 1.

[Claim 3] Said a majority of picture transmission means bundle the optical fiber of a book, and are made to unify, and it consists of flexible image guides to which flattening of the ends side was carried out. Said image pick-up means It is the floating instrumentation system of the fluid according to claim 2 constituted by consisting of CCD cameras so that said image guide might disassemble into each pixel the image by which image formation was carried out to one fiber end face with the objective lens with an optical fiber and the same image might be transmitted to the other end side by the side of a CCD camera.

[Claim 4] said scan optical system and an image pick-up means are

combined in one, and are constituted -- having -- the floating field of a fluid  
---dimensional [ 1 ] or two-dimensional -- the floating instrumentation system of  
the fluid according to claim 1 constituted movable.

[Claim 5] Said scan optical system is the floating instrumentation system of the  
fluid according to claim 1 which established the picture transmission means  
which forms in the floating in the hall of a fluid the laser sheet which intersects  
perpendicularly, and carries out optical transmission of the two-dimensional  
particle track image on this laser sheet that intersects perpendicularly,  
respectively.

[Claim 6] Irradiate the laser beam oscillated from laser oscillation equipment in  
the shape of a sheet at the floating field of a fluid, and a laser sheet is formed.  
While picturizing the particle track image on this laser sheet with an image image  
pick-up means and comparing and analyzing the brightness pattern of the  
particle track image of 2 picturized time of day Carry out averaging processing of  
the particle track image of the picturized time series, and it asks for the  
brightness pattern of an optical fiber array image. The floating measurement  
approach of the fluid characterized by calculating each migration direction and  
movement magnitude of a particle by removing the brightness pattern of this

optical fiber array image from the brightness pattern of said particle track image, and measuring floating of the fluid in said fluid flow field.

---

## DETAILED DESCRIPTION

---

### [Detailed Description of the Invention]

#### [0001]

[Field of the Invention] This invention relates to the floating instrumentation system and its measurement approach of the fluid which measures the rate of flow and flow direction of a fluid which start the floating measurement technique of the fluid which measures floating of the fluid in a complicated floating field to high degree of accuracy and a precision, especially flow the inside of a closed space.

#### [0002]

[Description of the Prior Art] It is very important for high-degree-of-accuracy-izing of the plant behavior prediction in a nuclear power plant, a thermal power station plant, a chemical processing plant, etc., a plant diagnosis, and a plant performance evaluation and device amelioration to measure floating of the fluid in a complicated floating field to high degree of accuracy and a precision. The

floating measurement of the floating measurement technique of the fluid under the severe environment which differs in the plant especially the external world, and the environment of system level is in a very difficult situation because of fluid flow measurement conditions with complicated flow.

[0003] Especially, the fluid flow measurement of the rate of flow of a fluid, a flow direction, etc. in the heat floating field under a severe environment is very difficult including access nature because of complicated fluid flow rate measurement conditions like [ in a reactor pressure vessel or the heat exchanger of a thermal power station plant ].

[0004] However, research of the visualization technique in a heat floating field progresses in recent years, and a particle image current meter (it is called PIV below Particle Image Velocimetry:) measurable to high degree of accuracy and a precision is being developed in floating of the fluid in a complicated floating field. By using together the image guide which bundled this PIV and optical fiber, floating measurement of the fluid in the external world and the closed space which differs in an environment is expectable like [ in a reactor pressure vessel ].

[0005] The fiberscope which transmits an image directly on the other hand using the image guide which bundled the optical fiber is developed as a

medical-application endoscope. The image guide was rich in flexibility and has achieved the duty important as a picture transmission means for an observation means.

[0006] The image guide developed by medical application is applied also to the industrial field, and is applied to the interior check of an aircraft engine, and observation of a short pipe or a reactor reactor core by the end of today.

[0007] Moreover, by technological innovation in recent years, the conventionally difficult long-distance picture transmission also becomes possible by development of the small optical fiber of optical loss, and it is in the limelight as a new maintenance inspection means from the remote place in a large-scale plant facility.

[0008] On the other hand, the research on PIV has improvement in time resolution and spatial resolving power, reservation of fluid flow measurement of high degree of accuracy, three-dimensions measurement, etc. in the trend performed briskly from both sides of hardware and software. One of the researches-and-developments trends of these PIV is the movement toward "improvement in precision" of the fluid rate-of-flow data obtained by PIV, and other one is the movement toward "applicability amplification of PIV."

[0009]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] Although PIV applied to the floating measurement technique of a fluid has been developed as a laboratory mold, it is requested that the object for development of this PIV technique should be expanded from a laboratory to utilization. The development request to utilization of the fluid flow measurement to real fluidization level is strong also in the ED of a direction to which the floating measurable range of the fluid by the PIV technique is expanded.

[0010] This invention was made in consideration of the situation mentioned above, and aims at offering the floating instrumentation system and its measurement approach of the fluid which can measure floating of the fluid in a complicated floating field with a sufficient precision to accuracy.

[0011] Other objects of this invention are to offer the floating instrumentation system and its measurement approach of the fluid which can measure the rate of flow and flow direction of a fluid of a floating field in the external world and the closed space which differs in an environment with a sufficient precision from remoteness to accuracy.

[0012] The object of further others of this invention optimizes the algorithm which

performs an image processing by the particle track pursuing method (Particle streak tracking velocimetry) for having used the image guide, and detects the floating condition of a fluid, and is to offer the floating instrumentation system and its measurement approach of the fluid which can perform floating distribution of a fluid with a sufficient precision to accuracy.

[0013]

[Means for Solving the Problem] In order that the floating instrumentation system of the fluid concerning this invention may solve the technical problem mentioned above The laser oscillation equipment which oscillates a laser beam as indicated to claim 1, The scan optical system for laser sheet formation which makes the oscillated laser beam supply to the floating in the hall of a fluid in the shape of a sheet, An image image pick-up means to picturize the two-dimensional particle track image on the laser sheet from this scan optical system, A timing control means to take and carry out synchronization actuation of said laser oscillation equipment and the image image pick-up means for timing, The brightness pattern of the particle track image of 2 time of day picturized with said image image pick-up means is compared and analyzed, and it has an image-processing means to measure each migration direction and movement

magnitude of a particle, and it constitutes so that floating and the velocity distribution of a fluid may be measured from the movement magnitude of each particle by this image-processing means.

[0014] Moreover, in order to solve the technical problem mentioned above, it sets to the floating instrumentation system of the fluid of this invention. As indicated to claim 2, said image image pick-up means As it has the picture transmission means which carries out optical transmission of the two-dimensional particle track image on the laser sheet from scan optical system, and an image pick-up means to picturize the two-dimensional particle track image by which optical transmission was carried out and being further indicated to claim 3 Said a majority of picture transmission means bundle the optical fiber of a book, and are made to unify, and it consists of flexible image guides to which flattening of the ends side was carried out. Said image pick-up means It consists of CCD cameras, and said image guide is constituted so that an optical fiber may decompose into each pixel the image by which image formation was carried out to one fiber end face with the objective lens and the same image may be transmitted to the other end side by the side of a CCD camera.

[0015] Furthermore, in order to solve the technical problem mentioned above, it

sets to the floating instrumentation system of the fluid of this invention. As indicated to claim 4, said scan optical system and an image image pick-up means it combines in one and constitutes -- having -- the floating field of a fluid ---dimensional [ 1 ] or two-dimensional -- said scan optical system, as it was constituted movable and indicated to claim 5 The laser sheet which intersects perpendicularly is formed in the floating field of a fluid, and the picture transmission means which carries out optical transmission of the two-dimensional particle track image on this laser sheet that intersects perpendicularly is established, respectively.

[0016] In order that the floating measurement approach of the fluid concerning this invention may solve the technical problem mentioned above As indicated to claim 6, irradiate the laser beam oscillated from laser oscillation equipment in the shape of a sheet at the floating field of a fluid, and a laser sheet is formed. While picturizing the particle track image on this laser sheet with an image image pick-up means and comparing and analyzing the brightness pattern of the particle track image of 2 picturized time of day Carry out averaging processing of the particle track image of the picturized time series, and brightness pattern distribution of an optical fiber array image is searched for. It is the approach of

calculating each migration direction and movement magnitude of a particle, and measuring floating of the fluid in said fluid flow field by removing the brightness pattern of this optical fiber array image from the brightness pattern of said particle track image.

[0017]

[Embodiment of the Invention] One operation gestalt of the floating instrumentation system of the fluid concerning this invention and its measurement approach is explained with reference to an accompanying drawing.

[0018] Drawing 1 is principle drawing showing the configuration of the floating instrumentation system of the fluid concerning this invention.

[0019] The floating instrumentation system 10 of the fluid of this invention is equipped with the laser oscillation equipment 11 which oscillates the laser beam of high power as the light source. To laser oscillation equipment 11, it is small, and semiconductor laser, a pulse laser, etc. which oscillate a high power laser beam are used. For example, semiconductor laser with a main oscillation wavelength of 808nm is used as the light source with the continuation light of output 16W.

[0020] The laser beam oscillated from laser oscillation equipment 11 is guided through the fiber 12 for light transmission at the scan optical system 13 for laser sheet formation. The scan optical system 13 makes the laser beam oscillated from laser oscillation equipment 11 project on the floating field 14 of a fluid in the shape of a sheet.

[0021] The floating field 14 of a fluid is formed in the external world and the closed space which differs in an environment. Moreover, according to the case, the floating field 14 of a fluid may be formed with the gestalt opened in the external world. Inside [ the floating fields 14 are a gas and a liquid ] consists of one of fluids at least. It is aimed concrete at the rate field of the fluid in the closed space in the heat exchanger of the downcomer section of a reactor pressure vessel, a reactor core shroud, and a thermal power station plant, or a steam generator etc. Moreover, the floating field of the fluid [ structured division / in contact with the stream or air current of a marine vessel, the aircraft, or an automobile ] of the circumference of equipment and materials can also be made into an object. In addition, principle drawing shown in drawing 1 shows the example of an experiment of the floating field of water as a floating field 14 of a fluid. In a container 15 or piping, from the nozzle 16, water is gushed and the

floating field 14 of the water as a fluid is formed.

[0022] The scan optical system 13 irradiates the oscillation laser beam from laser oscillation equipment 11 in the shape of a sheet at the floating field 14 of a fluid, and forms the laser sheet 17 in the fluid flow field 14. The floating field 14 of a fluid is visualized with this laser sheet 17. In the floating instrumentation system 10, in order to secure the spatial resolving power of the depth direction of the fluid flow field 14, the oscillation laser beam is irradiated in the shape of a sheet.

[0023] The scan optical system 13 is the laser beam exposure optical system for creation of the laser sheet 17, as shown in drawing 2. If semiconductor laser is used as laser oscillation equipment 11, outgoing radiation of the oscillation laser beam from semiconductor laser will be carried out with a big angle of divergence from the fiber 12 for light transmission. The laser beam by which outgoing radiation was carried out does not serve as light of axial symmetry, but has an astigmatism discrepancy, and configuration conversion of a laser beam becomes complicated.

[0024] For this reason, the lens group 18 as an optical means for laser sheet formation for forming the laser sheet 17 from the laser beam by which outgoing

radiation was carried out from the fiber 12 for light transmission is used for the scan optical system 13. The optical means for laser sheet formation is constituted combining the collimate lenses 19a and 19b of two sheets with which this lens group 18 makes a concurrency laser beam collimate an outgoing radiation laser beam, the long focal lens 20 which carries out the waist of the laser beam which became concurrency light with collimate lenses 19a and 19b to about about 1-2mm in the thickness direction of the laser sheet 17, and the cylindrical lens 21 which forms the laser sheet 17. A plano-convex lens is used for collimate lenses 19a and 19b.

[0025] The laser sheet 17 is formed in the floating field 14 of a fluid of the laser beam irradiated in the shape of a sheet from the scan optical system 13, and the floating field 14 of a fluid is visualized in the shape of a sheet. And measuring-range 17a of the laser sheet 17 is countered, and the picture transmission means 22 is established. As shown in drawing 1, the windowpane 23 for transparency is installed in container 15 wall near the picture transmission means 22 so that the image pick-up of the image on the laser sheet 17 may be attained with the image image pick-up means 29.

[0026] The image image pick-up means 29 has CCD camera 24 as a picture

transmission means 22 to transmit the image on the laser sheet 17, and an image pick-up means to picturize a two-dimensional particle track image. The picture transmission means 22 makes the two-dimensional particle track image on the laser sheet 17 transmit to CCD camera 24 as an image pick-up means. As the picture transmission means 22 is shown in drawing 3, the flexible image guide 26 which bundled thousands of to tens of thousands of optical fibers 25, and was made to unify (melting) is used. As shown in drawing 3, it is installed and an image guide 26 is bundled so that each location of the ends side of the bundled optical fiber 25 may correspond to accuracy. A flat surface is made to the ends side of an image guide 26, it disassembles into the optical fiber 25 as each pixel fiber the image by which image formation was carried out to one fiber end face with the objective lens 27, and is transmitting the same image to the fiber end face by the side of CCD camera 24. It is recorded on a CCD camera through the camera lens 28 from a fiber end face. The image image pick-up means 29 is made to carry out the direct image pick-up of the two-dimensional particle track image on the laser sheet 17, without having an image guide.

[0027] How an image appears by deciding the limitation (resolution) of the image of an image guide 24 by the diameter of the single optical fiber 25 and the

method of an array is decided by the total number and arrangement of the optical fiber 25 bundled by the image guide 26. Optical distribution of the quantity of light smaller than the core diameter of an optical fiber 25 is equalized while an optical fiber 25 is transmitted, and in each core cross section, brightness becomes uniform. Therefore, as for an image guide 26, the core diameter of an optical fiber 25 serves as a smallest unit of the spatial resolving power as a pixel (pixel).

[0028] As for the actual image guide 26, many optical fibers 25 of a book are arranged tidily and densely with \*\*\*\*\* (roppo dense array) structure. If the grid-like body of spacing almost equal to optical fiber spacing is observed by this image guide 26, a moire interference fringe unrelated to the intensity distribution of an objective image will arise.

[0029] Moreover, in the image guide 26 by which welding of the clad part is carried out between optical fibers 25, if the thickness of a clad becomes thin, the case where the light included in the core of one optical fiber 25 leaks to the next core will arise. For this reason, the boundary of an image spreads and the contrast of an image falls. For this reason, it becomes conditions that an image guide 26 does not have the too thin thickness of a clad when roppo dense array

structure is adopted.

[0030] On the other hand, the floating instrumentation system 10 of a fluid is equipped with the timing control means 30. The timing control means 30 consists of a timing scheduler 31 and a synchronizer 32. While laser oscillation equipment 11 is made to oscillate to the timing from the timing scheduler 31, a synchronization is taken by this oscillation timing and synchronizer 32, and CCD camera 24 is made to drive. That is, the timing control means 30 takes the synchronization with laser oscillation equipment 11 and CCD camera 22 as an actuation means, and is made to drive it.

[0031] A thing (resolution [ which has sensibility in a near infrared ray field ] VGA (640x480pixels), and frame rate 30Hz, and 8 bits (monochrome 256 gradation)) is used for a CCD camera. The image processing of the picture signal of the analog which CCD camera 24 took the oscillation timing from laser oscillation equipment 11 and a synchronization, was picturizing the two-dimensional particle track image on the laser sheet 17, and was picturized with CCD camera 24 is sent and carried out to the image-processing means 35, and the velocity distribution and flow direction of a fluid in the floating field 14 of a fluid are measured by the particle track pursuing method mentioned later. The camera of

a read-out method (progressive scan) is serially used for CCD camera 24, and the charge storage time of odd lines of arranged CCD and even lines is simultaneously performed to it, for example. This CCD camera 24 is excellent in vertical resolution compared with the usual camera.

[0032] Moreover, a digital picture signal is sent through the signal lines 37, such as a PCI bus, from the frame grabber board 36 and this frame grabber board 36 as an A/D converter which digitizes the analog picture signal from CCD camera 24, and the image-processing means 35 has the computer 38 which carries out digital image processing.

[0033] The floating instrumentation system 10 of this fluid carried out analog photography with CCD camera 24, and carried out digital processing with the image-processing means 35, and the analog photography and the digital-recording method which carries out digital recording are used for it.

[0034] The floating instrumentation system 10 of the fluid shown in drawing 1 showed the example corresponding to a laboratory. On the occasion of utilization, as shown in drawing 4 and drawing 5, the scan optical system 13 for laser sheets and the image image pick-up means 29 are unified. The picture transmission means 22 of the image image pick-up means 29 united with the

scan optical system 13 consists of drawing 4 as a probe 40 for visualization which can view laterally. The 45-degree rectangular prism 43 carries out picture transmission of the optical path by the fiberscope 44 which constituted the bending picture transmission means from the optical aperture (windowpane for transparency) 41 installed at probe 40 head. Drawing 4 (A) shows the example which used the floating instrumentation system of this unified fluid for the floating field of the water as a fluid in the container 15 of drawing 1. In drawing 5, the unified scan optical system 13 and the unified picture transmission means 22 of the image image pick-up means 29 are stored in the body casing 45.

[0035] Next, the floating measurement approach of a fluid is explained.

[0036] In the floating instrumentation system 10 of the fluid shown in drawing 1, the comparatively long luminescence time amount of the semiconductor laser used for lighting is taken, and the pathline (locus) of a particle is picturized to CCD camera 24. And it considers that the particle track image of this 2 picturized time of day that is different minute time in time is a brightness pattern, the computer 38 of the image-processing means 35 performs the image processing of a comparison and analysis, and the movement magnitude of each particle is presumed. In the floating metering device 10 of this fluid, this technique is called

the particle track pursuing method (Particle streak tracking velocimetry). This particle track pursuing method can give the information on enough particle images to the optical fiber single fiber used as the minimum spatial resolving power, without enlarging particle \*\*\*\* by recording the pathline of a particle beyond the need.

[0037] The particle track image expresses the image of the pathline in the time of day which floats in the water on the laser sheet 17 (fluid), and has each particle (foreign matters, such as suspended matter) which carries out diffusion distribution, and is constituted by the pixel (pixel) with the digitized brightness. In process of the image processing by the image-processing means 35, rectangle field 17a (refer to drawing 1 ) limited among each particle track image is taken out, and an image processing is carried out. A certain value of one point in the digitized particle track image is defined as a "brightness value", and that from which this brightness value is distributed over the field of rectangle field 17a is called a "brightness pattern."

[0038] The algorithm which presumes the movement magnitude of each particle in water (fluid) from a particle track image judges the obtained particle track image to be change of luminance distribution, and analyzes quantitatively the

amount which moves into time amount with the brightness pattern of the particle on the laser sheet 17 about each particle. A cross-correlation method is used for the analysis of the movement magnitude of this particle.

[0039] However, not only the brightness pattern of a particle but the brightness pattern of the array (bag structure to stack) of the optical fiber 25 of an image guide 26 exists in the particle track image picturized by CCD camera 24 through the image guide 26. The array brightness pattern of an optical fiber 25 serves as evil in the case of the analysis by the cross-correlation method, and causes an incorrect response (mistake vector) to the brightness pattern of a particle.

[0040] Then, in the floating instrumentation system 10 of the fluid concerning this invention, in order to attain optimization of floating measurement of the fluid by the particle track pursuing method, array clearance processing (background processing) of the optical fiber 25 used as the hindrance of cross-correlation count is performed.

[0041] the floating instrumentation system and its measurement approach of the fluid concerning an application-for-patent No. 207476 [ 2000 to ] official report -- a particle image flow pattern measurement (PIV) -- law -- applying -- this PIV -- a freezing image is used in law. By the usual PIV method, if particle \*\*\*\* is smaller

than one optical fiber 25 single fiber of an image guide 26, since the information on the already lost particle is not recoverable, the correlation coefficient computed is strongly influenced to a \*\*\*\*\* pattern, serves as very serious evil at speed detection, and causes an incorrect response.

[0042] moreover, PIV which will estimate the movement magnitude of a particle group if particle \*\*\*\* is made larger than one single fiber of the optical fiber 25 which gives the minimum spatial resolving power -- in law Since it is made desirable for there to be 6-8 particles in a reference aperture image also at the lowest, A comparatively large reference aperture image must be taken, and computational complexity increases enormously and will become not realistic as an algorithm (if the fields to search increase in number, computational complexity will increase in proportion to the 4th power).

[0043] for this reason, PIV using a freezing image -- in law, the parameter (particle \*\*\*\*, number density) demanded receives a limit dramatically. So, by the particle track pursuing method used by this invention, the comparatively long luminescence time amount of the semiconductor laser used for lighting was taken, the algorithm which estimates the movement magnitude of a particle to be each instead of record and a particle group for the pathline of a particle was built,

and it mounted in software. The information on enough particle images can be given to the single fiber of the optical fiber 25 used as the minimum spatial resolving power, without taking large particle \*\*\*\* by recording the pathline of each particle beyond the need. The technique of this particle track pursuing method (Particle streak tracking velocimetry) becomes possible by using the semiconductor laser which can control the luminescence time amount of laser easily.

[0044] By the particle track pursuing method used by this invention, calculation of the movement magnitude of a particle is mainly performed through six steps of the following procedures also including this background processing.

[0045] (1) Clearance of a noise (background processing)

The particle track image picturized with CCD camera 24 through the image guide 26 is processed, the addition average value of a brightness value is calculated for the particle track image obtained by time series for every pixel, and brightness pattern clearance of the fiber array of an optical fiber 25 is performed by lengthening an addition average value from the brightness value of each particle track image.

[0046] The image-processing algorithm of brightness pattern clearance of an

optical fiber array is explained below.

[0047] When setting the particle track image of measurement data to  $x$ , the particle track image  $x$  is [Equation 1].

$$x = s + n \quad \dots\dots (1)$$

但し、 $s$  は信号成分（光ファイバ配列の輝度パターン）  
 $n$  は雑音成分（粒子群の輝度パターン）

It is come out and expressed.

[0048] That is, in the particle track image  $x$  of measurement data, I think that the image with which the noise (brightness pattern of a particle) lapped with the signal (brightness pattern of an optical fiber array) is measured. Brightness pattern clearance processing of the optical fiber array by taking averaging is effective technique, when an SN ratio is small and it is possible to repeat measurement repeatedly on the case where there is no great difference also in the configuration frequency of a signal and a noise, or the same conditions.

[0049] When the load of the time series element is carried out and a formula 1 is displayed, it is expressed like a formula 2.

[0050]

[Equation 2]

$$x^i(k) = s^i(k) + n^i(k) \quad \dots \dots (2)$$

$i$  =  $i$ 枚目の粒子画像、

$k$  :  $i$ 枚目の粒子画像内の  $k$  番目のピクセル輝度値、

It is each \*\*\*\*.

[0051] In photography of a particle track image, the averaging  $x$  to the particle track image of  $M$  sheets, then  $M$  sheets ( $k$ ) can express the number of sheets of the captured particle track image as follows.

[0052]

[Equation 3]

$$\begin{aligned} x(k) &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x^i(k) \\ &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M s^i(k) + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M n^i(k) \quad \dots \dots (3) \end{aligned}$$

[0053] The brightness pattern  $s$  of an optical fiber array is still the brightness value of a basis, when averaging (it \*\* by  $M$ ) processing which becomes one  $M$  times the brightness value of this by  $M$  addition, and averages this is performed, since the same pattern will appear in a continuous particle track image, if it is the same experiment conditions (a light transmission system and light-receiving system). That is, the image in which only the optical fiber array in which a particle does not exist was reflected by averaging processing can be obtained, and if the

brightness value (brightness pattern) of an optical fiber array is lengthened for every pixel from the particle track image with which an optical fiber array exists, it will become removable [ the brightness pattern of an optical fiber array ].

[0054] Since the background luminance of the acquired image becomes homogeneity mostly over the whole screen by this background processing, also not only in validity but in binarization processing, it becomes an effective means to correlation computation.

[0055] (2) Perform binarization and an expansion-sized image processing as pretreatment for discriminating a particle from binarization and an expansion-sized image-processing particle track image. The locus image of the particle which floats in water (fluid) is influenced of the clad of an optical fiber 25, and will not become continuous, but will be recorded as an intermittent image (refer to drawing 6 (a)). Even if it carries out binarization processing of this intermittent particle image, the part in which information was lost by the clad is not recovered (refer to drawing 6 (b)). In order to make the locus image of these divided particles recognize as a migration locus of the same particle, an expansion-sized image processing is performed. An expansion-sized image processing will change all the pixels of the perimeter into 255 from 0, if the pixel

of attention exists (expansion processing of 8 connection). With this algorithm, the intermittent particle image divided by repeating this expansion-ized processing twice is recovered as a continuous locus image (refer to drawing 6 (c)).

[0056] (3) Since the particle image of plurality (large number) exists in labeling and the particle track image of one detection of a particle image location, perform labeling which makes each recognize as each particle. Another number is given to a connected component which is different in the same number in each connected pixel. It calls it labeling to assign a number to such each field. A center position is computed by the particle image identified by labeling returning to a former image. A main coordinate is searched for by the following methods of elastic center (Particle image centroid).

[0057] When the center of gravity which calculates X0 and Y0, and i and j are made into the coordinate of each point and I is made into the brightness value of the coordinate, centers of gravity X0 and Y0 are [Equation 4].

$$X_0 = \frac{\sum i \cdot I(i, j)}{\sum I(i, j)} \quad \dots\dots (4)$$

It is come out and expressed. The same is said of Y0.

[0058] (4) Since the center position of a particle track image was detected by particle image pretreatment of calculation [ of the integer movement magnitude by correlation count ] (1) - (3), calculate the movement magnitude of each particle with a cross-correlation method.

[0059] The particle track image which carried out digital processing of the two-dimensional particle track image in the 1st time of day picturized with CCD camera 24 of the floating instrumentation system 10 of a fluid In addition, a "reference image", The rectangle field limited among the "retrieval image" and the "retrieval image" in the particle track image which carried out digital processing of the two-dimensional particle track image in the 2nd time of day when a "reference aperture image" differs the rectangle field limited among "reference images" minute time from the 1st time of day is defined as a "retrieval aperture image", respectively.

[0060] Movement magnitude presumption of the particle by the cross-correlation method is the technique of having the correlation value R expressed with a degree type being known between the "retrieval aperture image" and the "reference aperture image", and asking for the similarity of the brightness pattern of each particle, carrying out comparison examination with this correlation value

R, and calculating the movement magnitude of each particle between 2 images.

[0061]

[Equation 5]

$$R(X', Y', \xi, \eta) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} (I_1(X' + i, Y' + j) - I_1^{\text{ave}})^2 \cdot (I_2(X' + i + \xi, Y' + j + \eta) - I_2^{\text{ave}})^2}{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} (I_1(X' + i, Y' + j) - I_1^{\text{ave}})^2 \cdot \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} (I_2(X' + i + \xi, Y' + j + \eta) - I_2^{\text{ave}})^2}} \quad \dots(5)$$

[0062]

[Equation 6]

$$I_1^{\text{ave}} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} I_1(X' + i, Y' + j)}{n \cdot m}, I_2^{\text{ave}} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} I_2(X' + i + \xi, Y' + j + \eta)}{n \cdot m} \quad \dots(6)$$

[0063] As shown in a formula 5 and a formula 6, the correlation value R takes the values from -1 to 1 by what (normalization) is \*\*(ed) with the mean square of the brightness value of a retrieval aperture image and a reference aperture image.

Two images mean that the similarity between aperture images is so large that the value of the correlation value R is large completely in accordance with the time of the correlation value R being 1.

[0064] In a formula 5 and a formula 6, I1 and I2 express the brightness of each

pixel of a reference aperture image and a retrieval aperture image, and xi and eta are expressed in the relative location of a retrieval aperture image and a reference aperture image. The locations xi and eta where a correlation value serves as max are equivalent to movement magnitude  $\Delta X'$  of the particle within an image, and  $\Delta Y'$ . Magnitude  $n_{xm}$  of a reference aperture image and the relative location with a reference aperture image are determined from the min and maximum velocity which are predicted.

[0065] (5) Since the integral value of the movement magnitude of a particle image can be found by correlation count of calculation (4) of subpixel movement magnitude, estimate subpixel movement magnitude by normal-distribution approximation (Gaussian peak-fit) used near [ three ] the peak of a correlation coefficient. It is independently computed about x and the direction of y, respectively.

[0066] (6) Since the movement magnitude of a particle track image can be found per pixel (pixel) with the procedure more than a calibration, it is changed into the movement magnitude in real space by calibration.

[0067] The glycerol solution which the marker particle mixed in drawing 7 is installed on a rotating disc, and the result of having computed the movement

magnitude of each particle by having carried out the image processing of these 60 particle track images for the particle track image which photoed false flow to drawing 8 by the particle track pursuing method is shown.

[0068]

[Example] Assessment of the engine performance of the floating instrumentation system of the fluid concerning this invention which performs the image processing by the particle track pursuing method to below, and the applicability to the real floating field of a floating instrumentation system are explained.

[0069]

[Example 1] (Assay of movement magnitude with a jogging base) the true value to which move the particle image drawn on the plate with a jogging base (mechanical stage), and measured the movement magnitude using the 70mmx70mm calibration plate, and it was made to move actually, and the floating instrumentation system of this invention -- Streak -- the measured value measured by law was compared, the error was surveyed, and the precision was authorized.

[0070] What has the lattice point of 64 points was used for the calibration plate into the 70mmx70mm rectangle. Therefore, the measurement range is

70mmx70mm. The image pick-up scale factor at this time was 5.011mm/pixel.

[0071] The particle used three kinds of particle diameter 3 and 6 and 8pixels. A particle image picturizes the particle by which seeding was carried out into the fluid with laser sheet lighting, prints this out by the printer, and is made to paste it up on a plate.

[0072] The image pick-up of a particle image picturized the particle image of plate Kami installed in the criteria location (criteria location in a calibration), and the particle image after migration with a jogging base with the CCD camera, and made this one image pair. It is equivalent to the approach which depends calculation of a movement magnitude vector on a cross-correlation method from an image pair, and is used for measurement of a real floating field. The number of vectors computed from the image pair of a lot was about 150 pieces.

[0073] Migration of the plate with which the particle image was drawn was performed in the x directions to every 50 micrometers 10mm, the image of 200 sheets was acquired, and 100 sets of image pairs were obtained. A cross-correlation method and normal-distribution approximation (Gaussian peak-fit) performed movement magnitude calculation.

[0074] Since the diameter of an optical fiber single fiber of the image guide 26

used as the minimum spatial resolving power is  $df=3.12$  pixels, it becomes  $d\tau=df=0.96$  and  $1.92$  or  $2.56$  times from the frequency analysis result of an image guide 26 to three kinds of particle \*\*\*\* 3 and 6, and 8 pixels, respectively.

[0075] drawing 9, drawing 10, and drawing 11 -- respectively -- Streak -- the bias error (Bias error), the dispersion error (RMS error), and probability density distribution (PDF) of the measurement result by law (the particle track pursuing method) are shown. In each drawing, b and the curve of  $d\tau=df=2.56$  are set [the curve of  $d\tau=df=0.96$ ] to c for a and the curve of  $d\tau=df=1.92$ , and the axis of abscissa in drawing shows true movement magnitude (Actual displacement) [pix.]. True movement magnitude can set PDF shown in drawing 11 to 0.5 pixels(es), 2.5 pixels, and 4.5 pixels, respectively.

[0076] Drawing 9 shows the bias error of the measurement value of the amount of x directional movements when moving a plate in the x directions, and can move aside from the number of migration pixels of a true value, it is what plotted whether \*\*\*\* shifted and measured, and the bias error shows the difference of the average of all the vectors of measurement within the limits, and a true value.

[0077] moreover, drawing 10 -- the root mean square of the measurement value of measurement within the limits -- taking -- drawing 11 -- true movement

magnitude -- the time of 0.5 pixels from a left crest, 2.5 pixels, and 4.5 pixels --  
Streak -- when the measured value by law (the particle pursuing method - TV)  
set the whole number of errors to 10 (%), it be show whether actual  
measurement be carried out in the place which shifted from how many pieces  
and a true value (%). It expresses that there are few errors as the width of face  
of this crest is narrow. For example, having measured with 2 pixels means about  
nine of 100 pieces at the time of 2.5-pixel migration of the crest of middle.

[0078] As shown in drawing 9 thru/or drawing 11, by the particle track pursuing  
method, the difference of the measurement value by particle diameter seldom  
appeared, but bias error beta was settled in the range of abbreviation  
 $\beta = **0.2 \text{ pixels}$ .

[0079] Since there is a clad (permeability is comparatively low) which does not  
let light pass in the optical fiber 25 used in the experiment, lack of a particle  
image becomes a cause and the oscillating effectiveness is seen. It is because  
the value change which depends on particle \*\*\*\* is not looked at by the bias error  
shown in drawing 9 but sufficient information can give this to it to the diameter of  
an optical fiber by the particle track.

[0080] Streak shown in drawing 10 -- although the dispersion error by law did not

depend on particle \*\*\*\*, either but the almost same value was shown, it became a comparatively big value. The configuration of a histogram not serving as normal distribution, but becoming horizontally near distribution near a true value results so that it may understand, even if this looks at probability density distribution. This is because correlation of a particle track image is taken, namely, the brightness value of a particle track is comparatively gently-sloping, and is because correlation coefficient distribution of the image will also become gently-sloping. By the particle track pursuing method, having taken the large particle compared with the usual particle image enlarges dispersion error epsilon (0.3 - 0.5pixels). However, not carrying out the method of generating with error that PDF roughly breaks by particle \*\*\*\* was shown, and it was checked that the precision of a bias error is effective.

[0081]

[Example 2] (Measurement by the real floating field) The floating field 14 of water (fluid) was established in the experiment container 15 as shown in drawing 1, the axial symmetry jet was measured with the floating instrumentation system 10 of this invention, and the engine performance of the floating instrumentation system of the fluid in real floating field measurement was examined.

[0082] Examination of the floating instrumentation system of a fluid was performed as compared with measurement by the Doppler type laser velocimeter (LDV).

[0083] Containers 15 are 250mm long, 250mm wide, and a cube container with

a height of 250mm, and gave the rectangle jet outlet (nozzle) 16 in the center.

The 3-30-micrometer globular form polyethylene particle was mixed in the working fluid as a marker particle at this using tap water. As shown in drawing 1,

once accumulating a working fluid in the lower storage tank 50, by the

experiment facility, it was supplied to the upside reservoir tank 52 with the pump

51. When the working fluid supplied to the reservoir tank 52 makes a part

overflow through amount of batches 52a, water head pressure (head) is kept

constant. a working fluid should pass the honeycomb and the mesh (not shown)

the floating adjustable valve 53 and for rectification from the reservoir tank 52 --

rectification-sized, it was made to spout in the facility container 15 from the axial

symmetry nozzle 16, and the floating field of water (fluid) was constituted. The

water overflowed within the reservoir tank 52 is returned in the storage tank 50

through a return pipe 54.

[0084] On the other hand, the contracted vein of the surface ratio was carried out

to about 10:1, the stable velocity distribution was acquired, and the nozzle 16 in a container 15 conducted the floating measurement experiment of a fluid(water) in the condition of becoming a stationary mostly. The system of coordinates of the floating field of water (fluid) made the core of nozzle 16 outlet the zero, and Z and radial were set to r and they set [ the direction of a jet (the height direction) ] the velocity component of theta and each direction to w, u, and v for the hoop direction.

[0085] Carrying out outlet velocity of the working fluid from a nozzle 16 in  $w=$  165mm/second, the number of lei nozzles to the outlet diameter ( $D= 7\text{mm}$ ) at this time was  $Re=1155$ . The water which overflows a container 15 was also once returned to the storage tank 50 through the return water piping 57 after the carrier beam by the receiver tank 56, and constituted the circulatory system 58 of water (fluid).

[0086] The probe 40 for visualization as shown in drawing 4 which the scan optical system 13 as shown in drawing 4 , and the picture transmission means 22 unified was used for the scan optical system 13 and the picture transmission means 22. As shown in drawing 4 , the probe 40 for visualization was inserted in the floating field 14 of water (fluid) from the upper part of a container 15, and the

laser beam was supplied to the vertical from the upper part, and photoed the particle track image by the fiberscope 44 from the probe 40 which counters. The distance of the laser sheet 17 and the light-receiving side of the probe 40 which counters is about 30mm. The measurement range is rectangle range which is range where the lattice point of a calibration plate exists and which is 10mmx10mm, and the thickness of the laser sheet 17 is 2mm.

[0087] To the diameter D of a nozzle 16, the potential core of the jet of water disappeared, the photography object domain was called developed region, and the momentum exchange with a perimeter fluid set it as the field of  $Z=6D$  to which a comparatively gently-sloping velocity distribution is acquired even in the jet shaft center.

[0088] The picturized particle track image performed the image processing by the particle track pursuing method (Streak law) with the image-processing means 35.

[0089] On the other hand, measurement by LDV (Doppler type laser velocimeter) also went separately in the cross section vertical to the jet shaft in  $Z=6D$ . These measurement assumed that a floating field was regular, adjusted the flow rate to the same conditions, and performed it.

[0090] The jet outlet conditions (Reynolds number:  $Re=1155$ ) measured by drawing 12 by LDV are shown. The curves d and e of mean velocity (LDV (mean)) and fluctuation velocity (LDV (rms)) are shown in drawing 12. Moreover, the velocity-vector map near height direction  $Z=6D$  is shown in drawing 13 from nozzle opening by the particle track pursuing method.

[0091] By the particle track image, the rate was computed by the above-mentioned particle track pursuing method (Streak law). The shaft-orientations mean velocity distribution f in  $Z=6D$  and its fluctuation velocity distribution g are shown in drawing 14 and drawing 15, respectively. An axis of abscissa is radial and axes of ordinate are shaft orientations. The measurement and LDV measurement by this system performed the comparison of the result which extracts this field, performs statistics processing and is depended on two mensuration from the shaft-orientations mean velocity distribution h which is an acquired velocity distribution, and its fluctuation velocity distribution i. Being computed corresponding to each particle, and since it is seeding of low number density comparatively, the locus image by the fiberscope in the floating instrumentation system of this fluid has little rate data obtained from the image pair of a lot. In order to compensate the little of such a statistic, a lot of images

needed to be photographed in the direction of time amount, and the statistic was computed from the image of 16000 sheets in this experiment. The shaft-orientations average and the fluctuation velocity distributions f and g which are shown in drawing 14 and drawing 15 were statistics 1000 [ about ] on each point. In measurement by LDV, an average and fluctuation velocity data were computed from the statistic 3000.

[0092] if the shaft-orientations fluctuation velocity distributions g and i shown in drawing 15 are compared -- Streak -- LDV and the inclination of law corresponded and bias was looked at by the magnitude. About this amount of bias, the larger amount than what was shown in the experiment by the feed bar (jogging base) was computed to LDV at the jet core ( $r=0$ ). Having the measurement value which can be trusted was checked about the shaft-orientations mean velocity distribution f and k shown in drawing 14.

[0093] if a fluctuation velocity distribution is referred to -- Streak -- law -- LDV and an inclination -- the fluctuation velocity distribution i of LDV of a match -- comparing -- Streak -- the fluctuation velocity distribution g of law showed the big value. from the irradiation time of laser -- converting -- Streak -- law was set to 0.63pixels(es) to LDV in  $r=-2.2\text{mm}$ , it has fitted in the precision by the feed bar

assay result, and it was confirmed that it is comparatively hard to be influenced of shear. Near a jet shaft, fluctuation is large and it is thought that minute fluctuation in the small field of a velocity gradient was not caught. Moreover, although fluctuation shows the big value compared with the perimeter in  $r=3.3\text{mm}$  and near  $r=-3.3\text{mm}$ , mean velocity is a low speed and it is thought that fluctuation is measured greatly relatively.

[0094] drawing 16 and drawing 17 -- Streak -- the shaft-orientations rate probability density distribution (PDF)  $j$  and  $k$  of the measured value in the jet shaft center ( $r=0\text{mm}$ ) and shear layer ( $r=2\text{mm}$ ) by law and LDV, and  $l$  and  $m$  are shown, respectively. Both mensuration is known by that measurement is performed normally in a jet shaft center. Moreover, it turns out that measurement is mostly performed normally also in a shear layer ( $r=2\text{mm}$ ).

[0095] The applicability to the engine performance and real floating field of a floating instrumentation system of this invention which perform the image processing by the particle track pursuing method is checked, and floating distribution (the rate of flow and flow direction) of a fluid can be measured with a sufficient precision to accuracy with this floating instrumentation system. Thereby, the floating condition of the fluid (coolant) of the floating field in the

severe closed space which differs in the external world and the environment like [ in a reactor pressure vessel ] can be measured to accuracy.

[0096] For example, the floating condition (the rate of flow of a coolant, a flow direction, a reactor core flow rate, stagnation condition) of the fluid in the downcomer section of a reactor pressure vessel or a reactor core shroud (coolant) is measurable. In a reactor pressure vessel and a steam generator, since the heat floating conditions in the heat exchanger of a thermal power station plant etc., i.e., flow, can measure to accuracy heat floating (floating distribution) which is not uniform with a sufficient precision, the thermal fatigue of a component part and the progress situation of corrosion are manageable to accuracy.

[0097] Since the thermal fatigue of a component part and the progress situation of corrosion are manageable by specifically measuring the stagnation condition of the support plate supporting the heat exchanger tube of the interior, such as a steam generator and a heat exchanger, and the fluid formed in a gap with walls, such as a heat exchanger, etc., it can operate efficiently safely more. Moreover, since the floating condition of a local fluid is clarified, the design of optimization, such as a heat exchanger, is attained. For example, according to the floating

instrumentation system shown in drawing 5 , also in a complicated gap, it is easily measurable.

[0098] Moreover, for example, in the floating instrumentation system shown in drawing 5 , the laser sheet of the 2-way which irradiates and goes direct so that a sheet-like laser beam may be intersected perpendicularly with a 2-way from the scan optical system 13 for laser sheet formation is formed. By picturizing the pathline of the particle on two laser sheets which intersect perpendicularly with CCD camera 24 through each picture transmission means, a motion of a particle can be measured in three dimension, as a result the floating condition of a fluid can be measured in three dimension. For example, what is necessary is to install the body casing 45 (to refer to drawing 5 ) in the downcomer section free [ the migration to either / at least / radial or a hoop direction ], to measure the movement magnitude of each particle to accuracy in three dimensions, moving the body casing 45 in radial or the hoop direction of X, i.e., the direction, and the direction of Y, and just to measure the floating condition of a fluid, in order to measure the coolant flow rate of the downcomer section of a reactor pressure vessel to accuracy.

[0099] In the floating instrumentation system 10 shown in drawing 1 , by unifying

scan optical system and a picture transmission system, as shown in drawing 4 and drawing 5, it can apply as a flight model and can apply still more broadly. For example, while being able to attain high-degree-of-accuracy-ization of a floating calibration of an internal pump by measuring the stagnation condition of the circumference of the internal pump in a reactor etc., the thermal fatigue of a component part and the progress situation of corrosion by the stagnation of a fluid etc. are manageable to accuracy. Moreover, it is also possible to be able to apply to the flow test measurement accompanying enlargement of the structure in a furnace accompanying amelioration of ABWR, the formation of shroud loess, etc., and to contribute to rationalization of a design and the improvement in effectiveness of a plant by high-degree-of-accuracy-ization of the further information.

[0100] Moreover, this floating instrumentation system is applicable to measurement of the floating field of the fluid [ structured division / in contact with a stream or an air current ] of the circumference of equipment and materials in a marine vessel, the aircraft, or an automobile. In this case, the floating field may be formed with the gestalt opened in the external world.

[0101] For example, the floating condition (the rate of flow, a flow direction, a

flow rate, stagnation condition) of the stream in the pars basilaris ossis occipitalis and wall surface of a marine vessel is measurable. Measurement of the floating condition which is not uniform can also be performed with a sufficient precision to accuracy. Progress situations, such as adhesion contamination of the shellfish which this generates in the stagnation part of the flow in a pars basilaris ossis occipitalis, a wall surface, etc. of a marine vessel etc., and fatigue of equipment and materials, are manageable to accuracy. Moreover, it is also possible to attain optimization of a marine vessel design and rationalization by flow test measurement accompanying the configuration of a hull, structure, a member, etc.

[0102] Also in the aircraft or an automobile, it can contribute to the optimization design of improvement in the speed, transit safety, etc. by flow test measurement.

[0103]

[Effect of the Invention] According to the floating instrumentation system and its measurement approach of the fluid concerning this invention Visualize the motion of each particle distributed in a fluid with a laser sheet, and the particle track image on the visualized laser sheet is picturized with an image image pick-up means. Each rate of flow and flow direction of a particle in a complicated

floating field can be measured, and floating conditions, such as the rate of flow of a fluid and a flow direction, can be measured with a sufficient precision to accuracy because compare and analyze the particle track image of 2 picturized time of day (minute time interval) and it carries out an image processing with an image-processing means.

[0104] Since measurement of the floating condition of the fluid in a complicated floating field can be performed by processing a particle track image with an image-processing means according to this invention, the floating condition of a fluid can be measured from a remote place, and the floating condition of the fluid in a closed space severe in environment can be measured with a sufficient precision to accuracy.

---

[Translation done.]

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2003-84005

(P2003-84005A)

(43)公開日 平成15年3月19日 (2003.3.19)

(51)Int.Cl.<sup>7</sup>

G 0 1 P 5/20  
13/00

識別記号

F I

G 0 1 P 5/20  
13/00

マークド (参考)

F 2 F 0 3 4  
D  
E

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 14 頁)

(21)出願番号 特願2001-280508(P2001-280508)

(22)出願日 平成13年9月14日 (2001.9.14)

(71)出願人 000003687

東京電力株式会社

東京都千代田区内幸町1丁目1番3号

(71)出願人 899000079

学校法人慶應義塾

東京都港区三田2丁目15番45号

(72)発明者 森 治嗣

神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4番1号

東京電力株式会社原子力研究所内

(74)代理人 100078765

弁理士 波多野 久 (外1名)

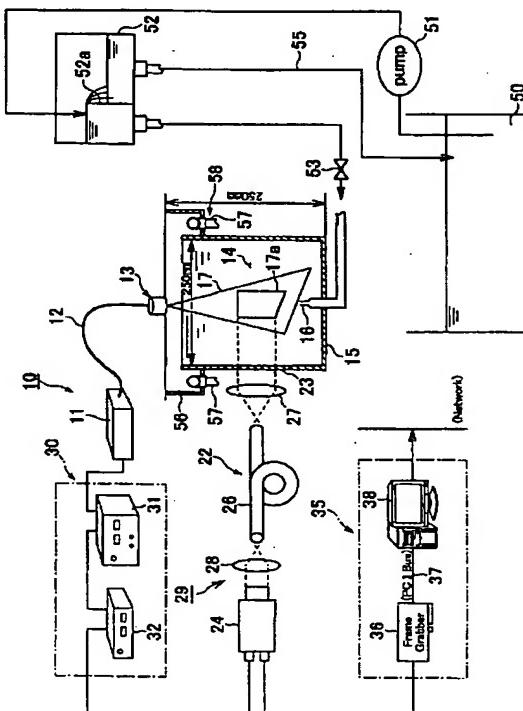
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 流体の流動計測システムおよびその計測方法

(57)【要約】

【課題】複雑な流動場における流体の流動を精度よく正確に遠隔から計測可能な流体流動計測技術を提供する。

【解決手段】流体の流動計測システムはレーザ発振装置11と、発振装置11から発振されたレーザ光を流体の流動場14にシート状に照射させるレーザシート形成用走査光学系13と、レーザシート17上の2次元粒子軌跡画像を撮像する画像撮像手段29と、レーザ発振装置11と画像撮像手段29とをタイミングをとって同期化駆動させるタイミングコントロール手段30と、撮像された粒子軌跡画像を画像処理する画像処理手段35とを有する。画像処理手段35は2時刻の粒子軌跡画像の輝度パターン分布を比較解析して個々の粒子の移動方向と移動量を計測し、流体流動場における流動・流速分布を測定したものである。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 レーザ光を発振させるレーザ発振装置と、発振されたレーザ光を流体の流動場内にシート状に投入させるレーザシート形成用走査光学系と、この走査光学系からのレーザシート上の2次元粒子軌跡画像を撮像する画像撮像手段と、前記レーザ発振装置と画像撮像手段をタイミングをとって同期化駆動させるタイミングコントロール手段と、前記画像撮像手段で撮像された2時刻の粒子軌跡画像の輝度パターンを比較・解析し、個々の粒子の移動方向および移動量を計測する画像処理手段を備え、この画像処理手段による個々の粒子の移動量から流体の流動・流速分布を計測するように構成したことを特徴とする流体の流動計測システム。

【請求項2】 前記画像撮像手段は、走査光学系からのレーザシート上の2次元粒子軌跡画像を光伝送する画像伝送手段と、光伝送された2次元粒子軌跡画像を撮像する撮像手段とを備えた請求項1に記載の流体の流動計測システム。

【請求項3】 前記画像伝送手段は、多数本の光ファイバを束ねて一体化させ、両端面が平面加工された可撓性のイメージガイドで構成され、前記撮像手段は、CCDカメラで構成されており、前記イメージガイドは、対物レンズにより一方のファイバ端面に結像された画像を光ファイバで各画素に分解してCCDカメラ側の他端面まで同一画像を伝送するように構成された請求項2に記載の流体の流動計測システム。

【請求項4】 前記走査光学系と画像撮像手段は、一体的に組み合わせて構成され、流体の流動場で1次元あるいは2次元移動可能に構成された請求項1に記載の流体の流動計測システム。

【請求項5】 前記走査光学系は、直交するレーザシートを流体の流動場内に形成し、この直交するレーザシート上の2次元粒子軌跡画像を光伝送する画像伝送手段をそれぞれ設けた請求項1に記載の流体の流動計測システム。

【請求項6】 レーザ発振装置から発振されるレーザ光を流体の流動場にシート状に照射してレーザシートを形成し、このレーザシート上の粒子軌跡画像を画像撮像手段で撮像し、撮像された2時刻の粒子軌跡画像の輝度パターンを比較・解析する一方、撮像された時系列の粒子軌跡画像を加算平均処理して光ファイバ配列画像の輝度パターンを求め、この光ファイバ配列画像の輝度パターンを前記粒子軌跡画像の輝度パターンから除去することにより個々の粒子の移動方向および移動量を求め、前記流体流動場における流体の流動を計測することを特徴とする流体の流動計測方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、複雑な流動場における流体の流動を高精度かつ精密に測定する流体の流動

計測技術に係り、特に閉空間内を流動する流体の流速および流れ方向を計測する流体の流動計測システムおよびその計測方法に関する。

## 【0002】

【従来の技術】 複雑な流動場における流体の流動を高精度かつ精密に測定することは、原子力発電プラントや火力発電プラント、化学プラント等におけるプラント挙動予測の高精度化、プラント診断、プラント性能評価や機器改良にとって極めて重要である。実機レベルのプラント、特に外界と環境を異にする厳しい環境下での流体の流動計測技術は、複雑な流れをもつ流体流動計測条件のために、流動計測が極めて困難な状況にある。

【0003】 中でも、原子炉圧力容器や火力発電プラントの熱交換器内のように、厳しい環境下にある熱流動場における流体の流速や流れ方向等の流体流動測定は、アクセス性を含め複雑な流体流量計測条件のために極めて困難である。

【0004】 しかしながら、近年熱流動場における可视化技術の研究が進み、複雑な流動場における流体の流動を高精度かつ精密に測定可能な粒子画像流速計 (Particle Image Velocimetry: 以下、PIVという。) が開発されつつある。このPIVと光ファイバを束ねたイメージガイドを併用することにより、原子炉圧力容器内のように、外界と環境を異にする閉空間における流体の流動測定が期待できる。

【0005】 一方、光ファイバを束ねたイメージガイドを用いて画像を直接伝送するファイバースコープは医療用内視鏡として開発されている。イメージガイドは、可撓性に富み、観察手段のための画像伝送手段として重要な役目を果している。

【0006】 医療用に開発されたイメージガイドは、今日では工業分野にも応用され、航空機エンジンの内部点検、短いパイプや原子炉炉心の観察に応用されている。

【0007】 また、近年の技術革新により、光損失の小さな光ファイバの開発によって、従来困難であった長距離の画像伝送も可能となり、大規模プラント設備における遠隔地からの新たな保守点検手段として脚光を浴びている。

【0008】 他方、PIVに関する研究は、ハードウェアおよびソフトウェアの両面から、時間分解能・空間分解能の向上、高精度の流体流動測定の確保、三次元計測等が盛んに行われる動向にある。これらPIVの研究開発動向の一つはPIVによって得られる流体流速データの「精度向上」の動きであり、他の一つは「PIVの適用範囲拡大」の動きである。

## 【0009】

【発明が解決しようとする課題】 流体の流動計測技術に適用されるPIVは、実験室型として開発されてきたが、このPIV技術の開発対象を実験室から実用化へと拡大することが要請されている。PIV技術による流体

の流動計測可能範囲を拡大する方向の技術開発、中でも実流動化レベルへの流体流動計測の実用化への開発要請が強くなっている。

【0010】本発明は、上述した事情を考慮してなされたもので、複雑な流動場における流体の流動を精度よく正確に計測することができる流体の流動計測システムおよびその計測方法を提供することを目的とする。

【0011】本発明の他の目的は、外界と環境を異にする閉空間内の流動場の流体の流速や流れ方向を精度よく正確に遠隔から測定できる流体の流動計測システムおよびその計測方法を提供するにある。

【0012】本発明のさらに他の目的は、イメージガイドを利用した粒子軌跡追跡法 (Particle streak tracking velocity) により画像処理を行って流体の流動状態を検出するアルゴリズムの最適化を行い、流体の流動分布を精度よく正確に行うことができる流体の流動計測システムおよびその計測方法を提供するにある。

### 【0013】

【課題を解決するための手段】本発明に係る流体の流動計測システムは、上述した課題を解決するために、請求項1に記載したように、レーザ光を発振させるレーザ発振装置と、発振されたレーザ光を流体の流動場内にシート状に投入させるレーザシート形成用走査光学系と、この走査光学系からのレーザシート上の2次元粒子軌跡画像を撮像する画像撮像手段と、前記レーザ発振装置と画像撮像手段をタイミングをとって同期化駆動させるタイミングコントロール手段と、前記画像撮像手段で撮像された2時刻の粒子軌跡画像の輝度パターンを比較・解析し、個々の粒子の移動方向および移動量を計測する画像処理手段を備え、この画像処理手段による個々の粒子の移動量から流体の流動・流速分布を計測するように構成したものである。

【0014】また、上述した課題を解決するために、本発明の流体の流動計測システムにおいては、請求項2に記載したように、前記画像撮像手段は、走査光学系からのレーザシート上の2次元粒子軌跡画像を光伝送する画像伝送手段と、光伝送された2次元粒子軌跡画像を撮像する撮像手段とを備えたものであり、さらに、請求項3に記載したように、前記画像伝送手段は、多数本の光ファイバを束ねて一体化させ、両端面が平面加工された可撓性のイメージガイドで構成され、前記撮像手段は、CCDカメラで構成されており、前記イメージガイドは、対物レンズにより一方のファイバ端面に結像された画像を光ファイバで各画素に分解してCCDカメラ側の他端面まで同一画像を伝送するように構成されたものである。

【0015】さらに、上述した課題を解決するために、本発明の流体の流動計測システムにおいては、請求項4に記載したように、前記走査光学系と画像撮像手段は、

一体的に組み合わせて構成され、流体の流動場で1次元あるいは2次元移動可能に構成されたものであり、また、請求項5に記載したように、前記走査光学系は、直交するレーザシートを流体の流動場に形成し、この直交するレーザシート上の2次元粒子軌跡画像を光伝送する画像伝送手段をそれぞれ設けたものである。

【0016】本発明に係る流体の流動計測方法は、上述した課題を解決するために、請求項6に記載したように、レーザ発振装置から発振されるレーザ光を流体の流動場にシート状に照射してレーザシートを形成し、このレーザシート上の粒子軌跡画像を画像撮像手段で撮像し、撮像された2時刻の粒子軌跡画像の輝度パターンを比較・解析する一方、撮像された時系列の粒子軌跡画像を加算平均処理して光ファイバ配列画像の輝度パターン分布を求め、この光ファイバ配列画像の輝度パターンを前記粒子軌跡画像の輝度パターンから除去することにより個々の粒子の移動方向および移動量を求め、前記流体流動場における流体の流動を計測する方法である。

### 【0017】

20 【発明の実施の形態】本発明に係る流体の流動計測システムおよびその計測方法の一実施形態について添付図面を参照して説明する。

【0018】図1は、本発明に係る流体の流動計測システムの構成を示す原理図である。

【0019】本発明の流体の流動計測システム10には、高出力のレーザ光を発振させるレーザ発振装置11が光源として備えられる。レーザ発振装置11には小型で高出力レーザ光を発振する半導体レーザやパルスレーザ等が用いられる。例えば、出力16Wの連続光で中心発振波長808nmの半導体レーザが光源として用いられる。

【0020】レーザ発振装置11から発振されたレーザ光は、送光用ファイバ12を通ってレーザシート形成用走査光学系13に案内される。走査光学系13はレーザ発振装置11から発振されたレーザ光を流体の流動場14にシート状に投射させるようになっている。

【0021】流体の流動場14は、外界と環境を異にする閉空間内に形成される。また、場合に応じて、外界に開放された形態で流体の流動場14が形成されていてよい。流動場14は、気体、液体のうちの少なくともいずれかの流体からなる。具体的には、例えば、原子炉圧力容器のダウンカマ部、炉心シュラウド、火力発電プラントの熱交換器や蒸気発生器内等の閉空間における流体の速度場を対象とする。また、船舶、航空機あるいは自動車等のような、水流や気流と接触する構造部位や機材まわりにおける流体の流動場も対象とすることができる。なお、図1に示す原理図では、流体の流動場14として水の流動場の実験例を示している。容器15あるいは配管内にノズル16より水を噴出させて流体としての水の流動場14を形成している。

【0022】走査光学系13は、流体の流動場14にレーザ発振装置11からの発振レーザ光をシート状に照射して流体流動場14にレーザシート17を形成している。このレーザシート17により流体の流動場14を可視化している。流動計測システム10では、流体流動場14の奥行き方向の空間分解能を確保するために、発振レーザ光をシート状に照射している。

【0023】走査光学系13は、図2に示すようにレーザシート17の作成のためのレーザ光照射光学系である。レーザ発振装置11として例えば半導体レーザを用いると、半導体レーザからの発振レーザ光は、送光用ファイバ12から大きな広がり角を持って出射される。出射されたレーザビームは軸対称の光となっておらず、非点較差があり、レーザビームの形状変換は複雑となる。

【0024】このため、走査光学系13には、送光用ファイバ12から出射されたレーザビームからレーザシート17を形成するためのレーザシート形成用光学手段としてのレンズ群18が用いられる。このレンズ群18は、出射レーザビームを並行レーザビームにコリメートさせる2枚のコリメートレンズ19a、19bと、コリメートレンズ19a、19bによって並行光となったレーザビームをレーザシート17の厚み方向で約1～2m程度にウエストさせる長焦点レンズ20と、レーザシート17を形成するシリンドリカルレンズ21とを組み合わせてレーザシート形成用光学手段が構成される。コリメートレンズ19a、19bには、例えば、平凸レンズが用いられる。

【0025】走査光学系13からシート状に照射されるレーザ光により、流体の流動場14にレーザシート17が形成され、流体の流動場14がシート状に可視化される。そして、レーザシート17の測定範囲17aに対向して画像伝送手段22が設けられる。図1に示したように、画像伝送手段22に近い容器15壁には、レーザシート17上の画像が画像撮像手段29で撮像可能となるように、透過用窓ガラス23が設置されている。

【0026】画像撮像手段29は、レーザシート17上の画像を伝送する画像伝送手段22と、2次元粒子軌跡画像を撮像する撮像手段としてのCCDカメラ24とを有する。画像伝送手段22はレーザシート17上の2次元粒子軌跡画像を撮像手段としてのCCDカメラ24に伝送させるようになっている。画像伝送手段22は、図3に示すように、数千本から数万本の光ファイバ25を束ねて一体化（溶融）させた可撓性のイメージガイド26が用いられる。イメージガイド26は、図3に示すように、束ねられた光ファイバ25の両端面の各位置が正確に対応するように並設されて束ねられる。イメージガイド26の両端面は平面に仕上げられ、対物レンズ27により一方のファイバ端面に結像された画像を各画素ファイバとしての光ファイバ25に分解し、同一画像をCCDカメラ24側のファイバ端面まで伝送している。フ

アイバ端面からカメラレンズ28を経てCCDカメラに記録される。画像撮像手段29はイメージガイドを備えずに、レーザシート17上の2次元粒子軌跡画像を直接撮像できるようにしてもよい。

【0027】イメージガイド24の画像の限界（解像度）は、単一の光ファイバ25の直径と配列の仕方によって決まり、像の見え方は、イメージガイド26に束ねられる光ファイバ25の総本数と並べ方によって決まる。光ファイバ25のコア径より小さな光量の光分布は、光ファイバ25を伝わる間に平均化され、各コア断面内では明るさは一様となる。したがって、イメージガイド26は光ファイバ25のコア径が画素（ピクセル）としての空間分解能の最小単位となる。

【0028】実際のイメージガイド26は、多数本の光ファイバ25が俵積み（六方稠密配列）構造で整然とかつ稠密に配列されている。このイメージガイド26で光ファイバ間隔とほぼ等しい間隔の格子状物体を観察すると、物体の像の強度分布と無関係なモアレ干渉縞が生じる。

【0029】また、光ファイバ25間にクラッド部分が融着されているイメージガイド26では、クラッドの厚さが薄くなると、1つの光ファイバ25のコアに入った光が隣のコアに漏れてしまう場合が生じる。このため、像の境界が滲み、像のコントラストが低下する。このため、イメージガイド26は、六方稠密配列構造を採用したとき、クラッドの厚さが薄過ぎないことが条件となる。

【0030】一方、流体の流動計測システム10には、タイミングコントロール手段30が備えられている。タイミングコントロール手段30はタイミングスケジューラ31とシンクロナイザ32とから構成される。タイミングスケジューラ31からのタイミングでレーザ発振装置11が発振せしめられる一方、この発振タイミングとシンクロナイザ32で同期をとってCCDカメラ24が駆動せしめられる。すなわち、タイミングコントロール手段30は、レーザ発振装置11と操作手段としてのCCDカメラ22との同期をとって駆動させるようになっている。

【0031】CCDカメラには、例えば、近赤外線領域に感度を持つ解像度VGA（ $640 \times 480$  pixels）、フレームレート30Hz、8ビット（モノクロ256階調）のものが用いられる。CCDカメラ24は、レーザシート17上の2次元粒子軌跡画像をレーザ発振装置11からの発振タイミングと同期をとって撮像しており、CCDカメラ24で撮像されたアナログの画像信号は画像処理手段35に送られて画像処理され、後述する粒子軌跡追跡法により流体の流動場14における流体の流速分布や流れ方向が計測される。CCDカメラ24には、例えば、逐次読み出し方式（プログレッシブスキャン）のカメラが用いられ、配列されたCCDの奇数ライ

ン、偶数ラインの電荷蓄積時間は同時に行われる。このCCDカメラ24は通常のカメラに較べ垂直方向の解像度に優れている。

【0032】また、画像処理手段35は、CCDカメラ24からのアナログ画像信号をデジタル化するA/D変換器としてのフレームグラバボード36と、このフレームグラバボード36からデジタル画像信号がPCIバス等の信号線37を介して送られ、デジタル画像処理するコンピュータ38とを有する。

【0033】この流体の流動計測システム10は、CCDカメラ24にてアナログ撮影し、画像処理手段35によりデジタル処理し、デジタル録画するアナログ撮影・デジタル録画方式を採用している。

【0034】図1に示す流体の流動計測システム10は実験室対応の例を示した。実用化に際しては、図4および図5に示すように、レーザシート用走査光学系13と画像撮像手段29は一体化される。図4では、走査光学系13と一体化した画像撮像手段29の画像伝送手段22は側方視可能な可視化用プローブ40として構成されている。プローブ40先端に設置された光学窓（透過用窓ガラス）41から45°直角プリズム43により光路を曲げ画像伝送手段を構成したファイバースコープ44にて画像伝送される。図4(A)は、この一体化した流体の流動計測システムを図1の容器15内における流体としての水の流動場に用いた例を示す。図5では、一体化した走査光学系13と画像撮像手段29の画像伝送手段22とを本体ケーシング45に格納している。

【0035】次に、流体の流動計測方法を説明する。

【0036】図1に示された流体の流動計測システム10では、照明に用いる半導体レーザの発光時間を比較的長くとり、CCDカメラ24に粒子の流跡（軌跡）を撮像する。そして、この撮像された時間的に微小時間異なる2時刻の粒子軌跡画像を輝度パターンとみなして画像処理手段35のコンピュータ38により比較・解析の画像処理を行い、個々の粒子の移動量を推定する。この流体の流動計測装置10においては、この手法を粒子軌跡追跡法(Particle streak tracking velocimetry)と呼ぶ。この粒子軌跡追跡法は、粒子の流跡を記録することにより、必要以上に粒子像径を大きくすることなく、かつ最小の空間分解能となる光ファイバ単纖維に対して十分な粒子像の情報を与えることができる。

【0037】粒子軌跡画像は、レーザシート17上の水（流体）中に浮遊し、拡散分布する個々の粒子（浮遊物等の異物）のある時刻での流跡の画像を表しており、デジタル化された輝度を持つピクセル（画素）によって構成される。画像処理手段35による画像処理の過程では、各粒子軌跡画像のうち限定された矩形領域17a（図1参照）を取り出して画像処理される。デジタル化された粒子軌跡画像中のある1点の値を「輝度値」と定

義し、この輝度値が矩形領域17aの領域に分布しているものを「輝度パターン」と称する。

【0038】粒子軌跡画像から水（流体）中の個々の粒子の移動量を推定するアルゴリズムは、得られた粒子軌跡画像を輝度分布の変化であると判断し、レーザシート17上の粒子の輝度パターンがある時間内に移動する量を個々の粒子について定量的に解析するものである。この粒子の移動量の解析には相互相関法を用いる。

【0039】しかし、イメージガイド26を通してCCDカメラ24によって撮像された粒子軌跡画像には、粒子の輝度パターンだけでなく、イメージガイド26の光ファイバ25の配列（俵積みの構造）の輝度パターンも存在する。光ファイバ25の配列輝度パターンが相互相関法による解析の際に弊害となり、粒子の輝度パターンに対して誤対応（過誤ベクトル）を招く。

【0040】そこで、本発明に係る流体の流動計測システム10においては、粒子軌跡追跡法による流体の流動測定の最適化を図るために、相互相関計算の妨げとなる光ファイバ25の配列除去処理（背景処理）を行う。

【0041】特願2000-207476号公報に係る流体の流動計測システムおよびその計測方法では、粒子画像流速計測(PIV)法を適用したものであり、このPIV法では、凍結画像が用いられる。通常のPIV法では、粒子像径がイメージガイド26の光ファイバ25単纖維一本より小さいと、もはや失われた粒子の情報は回復できるものではないので、算出される相関係数は俵積みの輝度パターンに強く影響を受け、速度検出に非常に大きな弊害となり、誤対応を招く。

【0042】また、最小の空間分解能を与える光ファイバ25の単纖維一本よりも粒子像径を大きくすると、粒子群の移動量を見積もるPIV法では、参照窓画像内に最低でも粒子は6～8個あることが望ましいとされるため、参照窓画像を比較的大きく取らなくてはならなくなり、計算量が莫大に増加してアルゴリズムとしては現実的ではないものとなる（探索する領域が増えるとその4乗に比例して計算量は増加する）。

【0043】このため、凍結画像を用いるPIV法では、要求されるパラメータ（粒子像径、数密度）は非常に制限を受ける。そこで、本発明で用いられる粒子軌跡追跡法では、照明に用いる半導体レーザの発光時間を比較的長くとり、粒子の流跡を記録、粒子群ではなく個々に粒子の移動量を見積もるアルゴリズムを構築し、ソフトウェアに実装した。個々の粒子の流跡を記録することにより、必要以上に粒子像径を大きくすることなく、かつ最小の空間分解能となる光ファイバ25の単纖維に対して十分な粒子像の情報を与えることができる。この粒子軌跡追跡法(Particle streak tracking velocimetry)の手法は、レーザの発光時間を容易に制御することができる半導体レーザを用いることによって可能となる。

【0044】本発明で用いる粒子軌跡追跡法では、この背景処理も含めて、主に以下の6段階の手順を経て粒子の移動量の算出が行われる。

【0045】(1)ノイズの除去（背景処理）

イメージガイド26を通してCCDカメラ24で撮像された粒子軌跡画像を処理し、時系列に得られた粒子軌跡画像を各ピクセル毎に輝度値の加算平均値を求め、各々の粒子軌跡画像の輝度値から加算平均値を引くことで、光ファイバ25のファイバ配列の輝度パターン除去を行う。

【0046】光ファイバ配列の輝度パターン除去の画像処理アルゴリズムを以下に説明する。

【0047】測定データの粒子軌跡画像を $x$ とするととき、粒子軌跡画像 $x$ は、

【数1】  

$$x = s + n \quad \dots \dots (1)$$

但し、 $s$ は信号成分（光ファイバ配列の輝度パターン）、 $n$ は雑音成分（粒子群の輝度パターン）

で表される。

【0048】すなわち、測定データの粒子軌跡画像 $x$ には、信号（光ファイバ配列の輝度パターン）に雑音（粒子の輝度パターン）が重なった画像を測定していると考える。加算平均を取ることによる光ファイバ配列の輝度パターン除去処理は、S/N比が小さく、信号と雑音の構成周波数にも大差がない場合や同じ条件で何度も測定を繰返すことが可能な場合に有効な手法である。

【0049】式1を時系列要素を負荷して表示すると、式2のように表される。

【0050】

【数2】  

$$x^i(k) = s^i(k) + n^i(k) \quad \dots \dots (2)$$

$i$ ： $i$ 枚目の粒子画像、

$k$ ： $i$ 枚目の粒子画像内の $k$ 番目のピクセル輝度値、

をそれぞれ示す。

【0051】粒子軌跡画像の撮影において、取り込んだ粒子軌跡画像の枚数をM枚とすれば、M枚の粒子軌跡画像に対する加算平均 $x(k)$ は次のように表せる。

【0052】

【数3】

$$\begin{aligned} x(k) &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x^i(k) \\ &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M s^i(k) + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M n^i(k) \quad \dots \dots (3) \end{aligned}$$

【0053】光ファイバ配列の輝度パターン $s$ は、同一の実験条件（送光系・受光系）であれば、連続する粒子軌跡画像においては同じパターンが出現するため、M回の加算によりM倍の輝度値となり、これを平均する（M

で除する）加算平均処理を行うと、もとの輝度値のままである。すなわち、加算平均処理により、粒子の存在しない光ファイバ配列のみ映った画像を得ることができ、光ファイバ配列の存在する粒子軌跡画像から各画素毎に光ファイバ配列の輝度値（輝度パターン）を引けば、光ファイバ配列の輝度パターンの除去が可能となる。

【0054】この背景処理によって、取得した画像の背景輝度は画面全体にわたってほぼ均一になるので、相関計算処理に対して有効だけでなく、二値化処理においても有効な手段となる。

【0055】(2)二値化・膨張化画像処理

粒子軌跡画像から粒子の識別を行うための前処理として、二値化および膨張化画像処理を行う。水（流体）中に浮遊する粒子の軌跡像は、光ファイバ25のクラッドの影響を受け、連続的なものとはならず、断続的な画像として記録される（図6(a)参照）。この断続的な粒子画像を二値化処理しても、クラッドによって情報の失われた部分は回復されない（図6(b)参照）。これらの分断された粒子の軌跡像を同一の粒子の移動軌跡として認識させるために、膨張化画像処理が行われる。膨張化画像処理とは、注目の画素が存在すれば、その周囲のすべての画素を0から255に変換するものである（8連結の膨張処理）。本アルゴリズムでは、この膨張化処理を2回繰り返すことで分断された断続的な粒子画像は、連続性のある軌跡画像として回復される（図6(c)参照）。

【0056】(3)ラベリングおよび粒子画像位置の検出

1枚の粒子軌跡画像には複数（多数）の粒子画像が存在するので、それを個々の粒子として認識させるラベリングを行う。それらの連結した画素には同じ番号を、異なる連結成分には別の番号を付ける。このような個々の領域に番号付けを行うことをラベリングと呼ぶ。ラベリングによって識別された粒子画像は、元画像に戻って中心位置が算出される。中心座標は、以下の重心法（Particle image centroid）によって求められる。

【0057】 $X_0$ 、 $Y_0$ を求める重心、 $i$ 、 $j$ を各点の座標、 $I$ をその座標の輝度値とすると、重心 $X_0$ 、 $Y_0$ は、

【数4】

$$X_0 = \frac{\sum i \cdot I(i, j)}{\sum I(i, j)} \quad \dots \dots (4)$$

で表される。 $Y_0$ についても同様である。

【0058】(4)相関計算による整数移動量の算出

(1)～(3)の粒子画像前処理によって、粒子軌跡画像の中心位置が検出されたので、個々の粒子の移動量を相互相関法により求める。

【0059】なお、流体の流動計測システム10のCC

Dカメラ24で撮像された第1時刻における2次元粒子軌跡画像をデジタル処理した粒子軌跡画像を「参照画像」と、「参照画像」のうち限定された矩形領域を「参照窓画像」と、第1時刻とは微小時間異なる第2時刻における2次元粒子軌跡画像をデジタル処理した粒子軌跡画像を「探索画像」と、「探索画像」のうち限定された矩形領域を「探索窓画像」とそれぞれ定義する。

【0060】相互相関法による粒子の移動量推定は、\*

$$R(X', Y', \xi, \eta)$$

$$= \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} (I_1(X' + i, Y' + j) - I_1^{\text{ave}})^2 \cdot (I_2(X' + i + \xi, Y' + j + \eta) - I_2^{\text{ave}})^2}{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} (I_1(X' + i, Y' + j) - I_1^{\text{ave}})^2 \cdot \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} (I_2(X' + i + \xi, Y' + j + \eta) - I_2^{\text{ave}})^2}} \quad \dots(5)$$

【0062】

$$I_1^{\text{ave}} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} I_1(X' + i, Y' + j)}{n \cdot m}, I_2^{\text{ave}} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} I_2(X' + i + \xi, Y' + j + \eta)}{n \cdot m} \quad \dots(6)$$

※※【数6】

【0063】式5および式6に示すように、相関値Rは、探索窓画像および参照窓画像の輝度値の二乗平均で除する（正規化）ことによって、-1から1までの値をとる。相関値Rが1のときに2画像は完全に一致し、相関値Rの値が大きいほど窓画像間の類似度が大きいことを意味する。

【0064】式5および式6において、 $I_1$ および $I_2$ は参照窓画像と探索窓画像の各画素の輝度を表し、 $\xi$ 、 $\eta$ は探索窓画像と参照窓画像の相対的な位置で表す。相関値が最大となる位置 $\xi$ 、 $\eta$ が画像内での粒子の移動量 $\Delta X'$ 、 $\Delta Y'$ に相当する。参照窓画像の大きさ $n \times m$ および参照窓画像との相対的な位置は、予測される最小および最大速度から決定される。

【0065】(5) サブピクセル移動量の算出

(4)の相関計算により、粒子画像の移動量の整数値が求まるので、相関係数のピークの近傍3点を用いた正規分布近似(Gaussian peak-fit)により、サブピクセル移動量を見積もる。 $x$ 、 $y$ 方向についてそれぞれ独立に算出される。

【0066】(6) 較正

以上の手順により、粒子軌跡画像の移動量がピクセル(pixel)単位で求まるので、較正により実空間での移動量に変換される。

【0067】図7にトレーサー粒子の混入したグリセリン溶液を回転円盤上に設置し、擬似的な流れを撮影した粒子軌跡画像を、図8にこの粒子軌跡画像60フレーム分を粒子軌跡追跡法により画像処理して個々の粒子の移動量を算出した結果を示す。

【0068】

【実施例】以下に、粒子軌跡追跡法による画像処理を行う本発明に係る流体の流動計測システムの性能の評価、

\*「探索窓画像」と「参照窓画像」との間で次式で表される相関値Rをもつことが知られており、この相関値Rをもって個々の粒子の輝度パターンの類似度を求め、比較検討して2画像間の個々の粒子の移動量を求める手法である。

【0061】

【数5】

20 および流動計測システムの実流動場への適用性について説明する。

【0069】

【実施例1】(微動台による移動量の検定)平板上に描かれた粒子画像を微動台(メカニカルステージ)によって移動させ、その移動量を70mm×70mmの較正板を使って測定し、実際に移動させた真の値と、本発明の流動計測システムによりStretch法により計測した測定値とを比較し、誤差を実測してその精度の検定を行った。

【0070】較正板は、70mm×70mmの矩形内に64点の格子点を有するものを用いた。したがって、計測範囲は70mm×70mmである。このときの撮像倍率は、5.011mm/pixelであった。

【0071】粒子は粒子径3、6、8pixelの3種類を用いた。粒子像は、流体中にシーディングされた粒子をレーザシート照明によって撮像し、これをプリンタによってプリントアウトして平板上に接着させたものである。

【0072】粒子像の撮像は、基準位置(較正における基準位置)に設置された平板上の粒子像と微動台による移動後の粒子像とをCCDカメラにより撮像し、これを一つの画像対とした。画像対から移動量ベクトルの算出は相互相関法によるものであり、実流動場の計測に用いられる方法と同等のものである。一組の画像対から算出されるベクトル数は約150個であった。

【0073】粒子像の描かれた平板の移動は、 $x$ 方向に50μmづつ10mmまで行い、200枚の画像を取得し、100組の画像対を得た。移動量算出は、相互相関法および正規分布近似(Gaussian peak-fit)により行った。

【0074】最小の空間分解能となるイメージガイド26の光ファイバ单纖維径は、イメージガイド26の周波数解析結果から $d_f = 3.12 \text{ pixels}$ であるので、3種類の粒子像径3、6、8 pixelsに対しで、それぞれ $d\tau/d_f = 0.96, 1.92, 2.56$ 倍となる。

【0075】図9、図10および図11にそれぞれ、Stretch法(粒子軌跡追跡法)による計測結果の偏り誤差(Bias error)、ばらつき誤差(RMS error)および確率密度分布(PDF)を示す。各図において、 $d\tau/d_f = 0.96$ の曲線をa、 $d\tau/d_f = 1.92$ の曲線をb、 $d\tau/d_f = 2.56$ の曲線をcとし、図中の横軸は真の移動量(Actual displacement) [pixels]を示す。図11に示されたPDFは、真の移動量がそれぞれ0.5 pixels、2.5 pixels、4.5 pixelsにおけるものである。

【0076】図9は、平板をx方向に移動させたときのx方向移動量の計測値の偏り誤差を示しており、真値の移動ピクセル数からだけだけははれて測定したかをプロットしたもので、偏り誤差は計測範囲内の全ベクトルの平均値と真値との差を示している。

【0077】また、図10は計測範囲内の計測値のルート二乗平均をとったものであり、図11は、真の移動量が、左の山から0.5ピクセル、2.5ピクセル、4.5ピクセルの時、Stretch法(粒子追跡法: PTV)による測定値が、全体の誤差数を10(%)とした時、何個(%)、真値よりずれたところで実際計測されたか、示している。この山の幅が狭ければ狭いほど、誤差は少ないことを表している。例えば、真中の山の2.5ピクセル移動の時、2ピクセルと計測したのは、100個のうち約9個ということを意味する。

【0078】図9ないし図11に示されたように、粒子軌跡追跡法では、粒子径による計測値の相違はあまり現れず、偏り誤差 $\beta$ は約 $\beta = \pm 0.2 \text{ pixels}$ の範囲に収まった。

【0079】実験で用いた光ファイバ25には光を通さない(透過率が比較的低い)クラッドがあるために、粒子像の欠落が原因となり、振動効果が見られる。図9に示された偏り誤差には、粒子像径に依る値の変化は見られず、これは粒子軌跡によって光ファイバ径に対して十分な情報が与えることによる。

【0080】図10に示されたStretch法によるばらつき誤差も粒子像径に依らずほぼ同一の値を示しているが、比較的大きな値となった。これは、確率密度分布を見ても分かるように、ヒストグラムの形状が正規分布とはならず、真値付近で水平に近い分布となることが原因している。これは粒子軌跡像の相関をとっているためであり、すなわち、粒子軌跡の輝度値は比較的なだらかであり、その画像の相関係数分布もまたなだらかなもの

となるためである。粒子軌跡追跡法では、その粒子を通常の粒子画像に比べ大きくとっていることが、ばらつき誤差 $\varepsilon_k$ を大きくする( $0.3 \sim 0.5 \text{ pixels}$ )。しかし、粒子像径によってPDFが大きく割れてしまうような誤差の発生の仕方はしないことが示され、また、偏り誤差の精度は有効であることが確認された。

#### 【0081】

【実施例2】(実流动場での計測)図1に示すような実験容器15内に水(流体)の流动場14を設けて本発明の流动計測システム10により軸対称噴流の計測を行い、実流动場計測における流体の流动計測システムの性能を検討した。

【0082】流体の流动計測システムの検討は、ドップラ式レーザ流速計(LDV)による計測と比較して行った。

【0083】容器15は、例えば縦250mm、横250mm、高さ250mmの立方体容器であり、中央に矩形噴流出口(ノズル)16を持たせた。作動流体には水道水を用い、これにトレーサー粒子として3~30μmの球形ポリエチレン粒子を混入した。図1に示すように、実験設備では作動流体を、下部の貯溜タンク50に一旦ためた後、ポンプ51により上部のリザーバタンク52へ供給した。リザーバタンク52に供給された作動流体は一部を仕切量52aを介してオーバーフローすることにより、水頭圧(ヘッド)が一定に保たれる。作動流体はリザーバタンク52から流动調節バルブ53、整流用のハニカムおよびメッシュ(図示せず)を経て整流化し、軸対称ノズル16から設備容器15内に噴出させて水(流体)の流动場を構成した。リザーバタンク52内でオーバーフローした水は戻り管54を経て貯溜タンク50内に戻される。

【0084】一方、容器15内のノズル16は面積比が約10:1に縮流され、安定した速度分布が得られ、ほぼ定常になる状態において流体(水)の流动計測実験を行った。水(流体)の流动場の座標系はノズル16出口の中心を原点とし、噴流方向(高さ方向)をZ、半径方向をr、周方向をθ、それぞれの方向の速度成分をw、u、vとした。

【0085】ノズル16からの作動流体の出口速度を $w = 165 \text{ mm/s}$ とし、このときの出口直径( $D = 7 \text{ mm}$ )に対するレイノズル数は $Re = 1155$ であった。容器15をオーバーフローする水も、受けタンク56で一旦受けた後、戻り水配管57を経て貯溜タンク50に戻され、水(流体)の循環系58を構成した。

【0086】走査光学系13と画像伝送手段22は、図4に示すような走査光学系13と画像伝送手段22とが一体化した図4に示すような可視化用プローブ40を用いた。図4に示すように、可視化用プローブ40を容器15の上方から水(流体)の流动場14に挿入し、レーザ光は上方から鉛直に投入され、対向するプローブ40

からファイバースコープ44により粒子軌跡画像を撮影した。レーザシート17と対向するプローブ40の受光面との距離は約30mmである。計測範囲は較正板の格子点が存在する範囲である、例えば10mm×10mmの矩形範囲であり、レーザシート17の厚さは2mmである。

【0087】撮影対象領域は、ノズル16の直径Dに対して、水の噴流のポテンシャルコアが消滅し、発達領域といわれ、周囲流体との運動量交換が噴流軸中心にまでおよび、比較的なだらかな速度分布の得られるZ=6Dの領域に設定した。

【0088】撮像された粒子軌跡画像は画像処理手段35で粒子軌跡追跡法(Streak法)により画像処理を行った。

【0089】一方、LDV(ドップラ式レーザ流速計)による計測もZ=6Dにおける噴流軸に垂直な断面において別個に行った。これらの計測は、流動場が定常であると仮定し流量を同一条件に調整して行った。

【0090】図12にLDVで測定された噴流出口条件(レイノルズ数: Re=1155)を示す。図12には、平均速度(LDV(means))と変動速度(LDV(rms))の曲線d, eを示す。また、図13に粒子軌跡追跡法によるノズル口から高さ方向Z=6D付近の速度ベクトルマップを示す。

【0091】粒子軌跡画像では、前述の粒子軌跡追跡法(Streak法)によって速度を算出した。図14および図15に、それぞれZ=6Dにおける軸方向平均速度分布fと、その変動速度分布gを示す。横軸は半径方向、縦軸は軸方向である。本システムによる計測とLDV計測は、得られた速度分布である軸方向平均速度分布hとその変動速度分布iよりこの領域を抽出し、統計処理を行って2つの計測法による結果の比較を行った。この流体の流動計測システムにおけるファイバースコープによる軌跡画像は、個々の粒子に対応して算出されこと、また、比較的低数密度のシーディングであるため、一組の画像対から得られる速度データが少ない。このような統計量の少なさを補うため、時間方向に多量の画像を撮る必要があり、本実験では16000枚の画像から統計量を算出した。図14および図15に示す軸方向平均および変動速度分布f, gは各点で統計量約1000であった。LDVによる計測では、統計量3000から平均・変動速度データを算出した。

【0092】図15に示される軸方向変動速度分布g, iを比較すると、Streak法はLDVと傾向が一致し、その大きさにはバイアスが見られた。このバイアス量に関しては、噴流中心( $r=0$ )において、LDVに対しては、送り台(微動台)による実験で示されたものよりも大きい量が算出された。図14に示された軸方向平均速度分布f, kについては信頼しうる計測値を有することが確認された。

【0093】変動速度分布を参照すると、Streak法はLDVと傾向が一致するものの、LDVの変動速度分布iに比べStreak法の変動速度分布gは大きな値を示した。レーザの照射時間から換算し、Streak法は $r=-2\text{--}2\text{ mm}$ において、LDVに対して0.63pixelsとなり、送り台検定結果による精密度に収まっており、比較的せん断の影響を受けにくいことが確かめられた。噴流軸付近では、変動が大きくなっている、速度勾配の小さい領域での微小な変動までは捉えられなかつたものと考えられる。また、 $r=3\text{--}3\text{ mm}$ および $r=-3\text{--}3\text{ mm}$ 付近において変動が周囲に比べ大きな値を示しているが、平均流速が低速であり、相対的に変動が大きく計測されていると考えられる。

【0094】図16および図17に、Streak法とLDVによる噴流軸中心( $r=0\text{ mm}$ )およびせん断層( $r=2\text{ mm}$ )における測定値の軸方向速度確率密度分布(PDF)j, kおよびl, mをそれぞれ示す。噴流軸中心では、両計測法とも正常に計測が行われていることが分かる。また、せん断層( $r=2\text{ mm}$ )においてもほぼ計測は正常に行われていることが分かる。

【0095】粒子軌跡追跡法による画像処理を行う本発明の流動計測システムの性能と実流動場への適用性が確認され、この流動計測システムにより流体の流動分布(流速および流れ方向)の測定を、精度よく正確に行うことができる。これにより、原子炉圧力容器内のような外界と環境を異にする厳しい閉空間内の流動場の流体(冷却材)の流動状態を正確に測定することができる。

【0096】例えば、原子炉圧力容器のダウンカマ部や炉心シラウド内の流体(冷却材)の流動状態(冷却材の流速や流れ方向、炉心流量、よどみ状態)の計測を行うことができる。原子炉圧力容器内や蒸気発生器内、火力発電プラントの熱交換器内等の熱流動状態、すなわち、流れが一様でない熱流動(流動分布)の測定を正確に精度よく行うことができるので、構成部品の熱疲労や腐食の進歩状況を正確に管理することができる。

【0097】具体的には、蒸気発生器や熱交換器等の内部の伝熱管を支える支持板と熱交換器等の内壁等との間隙に形成される流体のよどみ状態を計測することによって、構成部品の熱疲労や腐食の進歩状況を管理することができるので、より安全に、効率的に操業することができる。また、局部的な流体の流動状態が明らかにされるので熱交換器などの最適化の設計が可能となる。例えば、図5に示された流動計測システムによれば、複雑な間隙においても容易に計測することができる。

【0098】また、例えば、図5に示された流動計測システムにおいて、レーザシート形成用走査光学系13からシート状のレーザ光を2方向に直交するように照射して直行する2方向のレーザシートを形成し、直交する2つのレーザシート上の粒子の流跡をそれぞれの画像伝送手段を介してCCDカメラ24で撮像することにより、

粒子の動きを3次元的に測定でき、ひいては、流体の流動状態を3次元的に測定できる。例えば、原子炉圧力容器のダウンカマ部の冷却材流量を正確に測定するには、ダウンカマ部に本体ケーシング45(図5参照)を半径方向および周方向の少なくとも一方に移動自在に設置し、本体ケーシング45を半径方向または周方向、すなわち、X方向またはY方向に移動させつつ個々の粒子の移動量を立体的に正確に測定し、流体の流動状態を測定するようにすればよい。

【0099】図1に示す流動計測システム10において、図4および図5に示すように走査光学系と画像伝送系とを一体化することにより実用機として応用することができ、さらに広範囲に適用することができる。例えば、原子炉内のインターナルポンプまわりのよどみ状態等を計測することによりインターナルポンプの流動較正の高精度化を図ることができるとともに、流体のよどみ等による構成部品の熱疲労や腐食の進捗状況を正確に管理することができる。また、ABWRの改良に伴う炉内構造物の大型化、シュラウドレス化等に伴う流動試験測定に適用可能であり、さらなる情報の高精度化により設計の合理化、またプラントの効率向上に寄与することも可能である。

【0100】また、この流動計測システムは、船舶、航空機あるいは自動車等において、水流あるいは気流と接触する構造部位や機材まわりにおける流体の流動場の計測に適用することができる。この場合、外界に開放された形態で流動場が形成されていてもよい。

【0101】例えば、船舶の底部や壁面における水流の流動状態(流速や流れ方向、流量、よどみ状態)を計測することができる。流れが一様でない流動状態の測定をも正確に精度よく行うことができる。これにより船舶の底部や壁面等における流れのよどみ箇所等に発生する貝類等の付着汚染や機材の疲労等の進捗状況を正確に管理することができる。また、船体の形状、構造、部材等に伴う流動試験測定により、船舶設計の最適化、合理化を図ることも可能である。

【0102】航空機あるいは自動車においても、流動試験測定により高速化、走行安全性等の最適化設計などに寄与することができる。

### 【0103】

【発明の効果】本発明に係る流体の流動計測システムおよびその計測方法によれば、流体中に分布する個々の粒子の動きを、レーザシートで可視化し、可視化されたレーザシート上の粒子軌跡画像を画像撮像手段で撮像し、撮像された2時刻(微小時間間隔)の粒子軌跡画像を画像処理手段で比較・解析し、画像処理することで、複雑な流動場における個々の粒子の流速や流れ方向を測定して流体の流速や流れ方向等の流動状態を精度よく正確に測定することができる。

### 【0104】本発明によれば、複雑な流動場における流

体の流動状態の測定を画像処理手段で粒子軌跡画像を処理することにより行うことができるので、遠隔地から流体の流動状態を測定でき、環境的に厳しい閉空間内の流体の流動状態を正確に精度よく測定できる。

### 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係る流体の流動計測システムの一実施形態を示す概念図。

【図2】本発明に係る流体の流動計測システムに組み込まれるレーザシート用走査光学系の原理を示す図。

10 【図3】本発明に係る流体の流動計測システムに組み込まれる画像伝送手段の原理を示す図。

【図4】本発明に係る流体の流動計測システムを実用的な計測システムに適用した概念図。

【図5】本発明に係る流体の流動計測システムを実用的な計測システムに適用した概念図。

【図6】本発明に係る流体の流動計測システムで撮像された粒子軌跡画像の二値化処理および膨張化処理の結果を示す図。

20 【図7】本発明に係る流体の流動計測システムで撮像された粒子軌跡画像を示す図。

【図8】図7に示された粒子軌跡画像を画像処理した計算結果を示す図。

【図9】本発明に係る流体の流動計測システムによる計測結果の偏り誤差を示す図。

【図10】本発明に係る流体の流動計測システムによる計測結果のばらつき誤差を示す図。

【図11】本発明に係る流体の流動計測システムによる計測結果の確率密度分布を示す図。

30 【図12】軸対称噴流の計測実験における噴流出口条件を示す図。

【図13】本発明の流動計測システムにおいて、粒子軌跡追跡法で画像処理した計算結果を示す図。

【図14】本発明の流動計測システムとLDVによる計測で得られたZ=6Dにおける軸方向平均速度分布を示す図。

【図15】本発明の流動計測システムとLDVによる計測で得られたZ=6Dにおける軸方向変動速度分布を示す図。

40 【図16】本発明の流動計測システムとLDVによる計測で得られたr=0mmにおける軸方向速度確率密度分布を示す図。

【図17】本発明の流動計測システムとLDVによる計測で得られたr=2mmにおける軸方向速度確率密度分布を示す図。

### 【符号の説明】

10 流体の流動計測システム

11 レーザ発振装置(光源)

12 送光用ファイバ

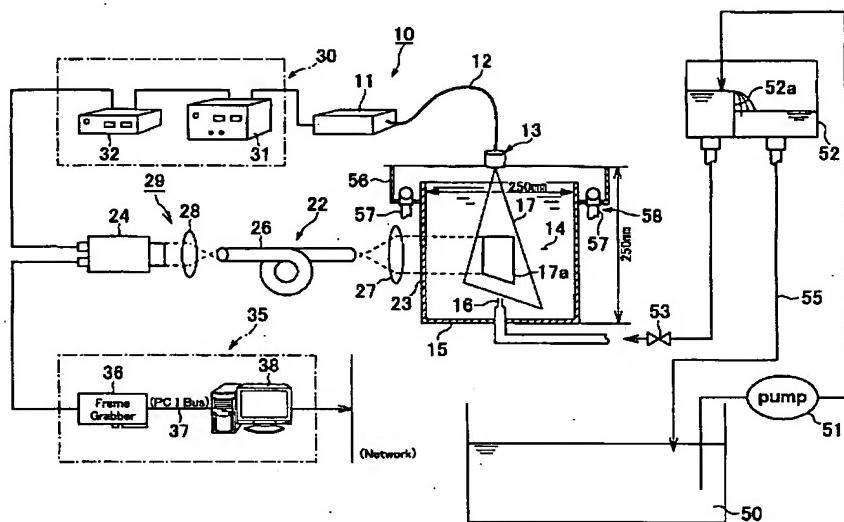
13 走査光学系

14 流体の流動場

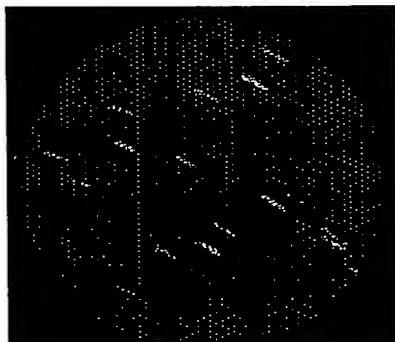
- 1 5 容器  
 1 6 ノズル  
 1 7 レーザシート  
 1 8 レンズ群（レンズ光学系）  
 1 9 a、1 9 b コリメートレンズ  
 2 0 長焦点レンズ  
 2 1 シリンドリカルレンズ  
 2 2 画像伝送手段  
 2 4 C C D カメラ（撮像手段）  
 2 5 光ファイバ  
 2 6 イメージガイド  
 2 7 対物レンズ  
 2 9 画像撮像手段  
 3 0 タイミングコントロール手段  
 3 1 タイミングスケジューラ

- \* 3 2 シンクロナイザ  
 3 5 画像処理手段  
 3 6 フレームグラバボード  
 3 7 P C I バス  
 3 8 コンピュータ  
 4 0 可視化用プローブ  
 4 1 透過用窓ガラス  
 4 3 45°直角プリズム  
 4 4 ファイバースコープ（画像伝送手段）  
 10 4 5 本体ケーシング  
 5 0 眇溜タンク  
 5 1 ポンプ  
 5 2 リザーバタンク  
 5 3 バルブ  
 \* 5 8 流体の循環系

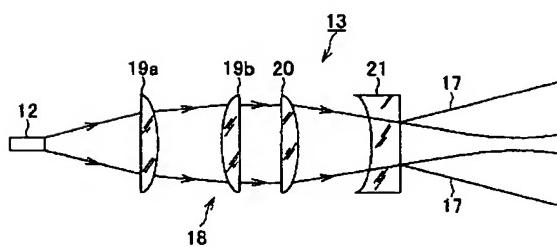
【図1】



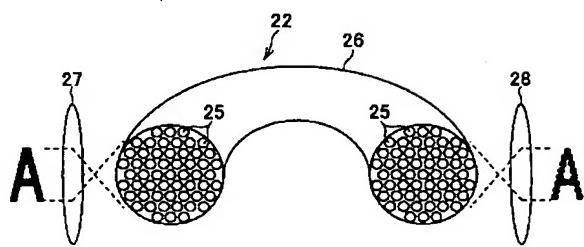
【図7】



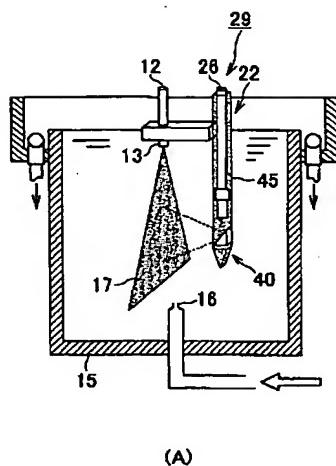
【図2】



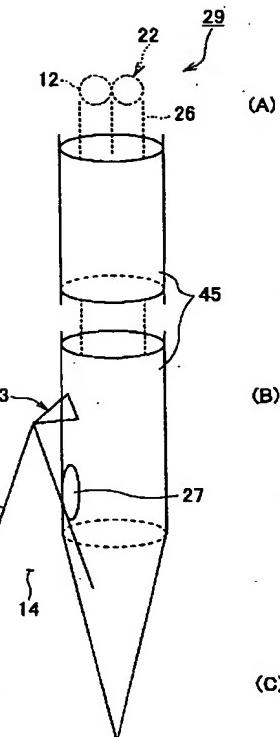
【図3】



【図4】



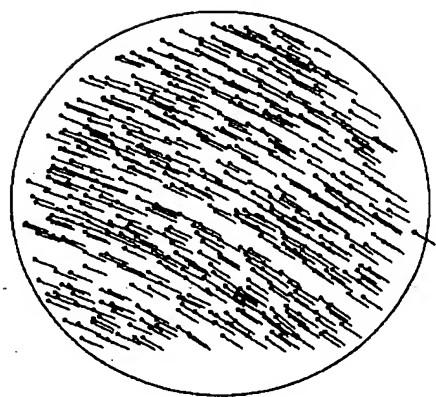
【図5】



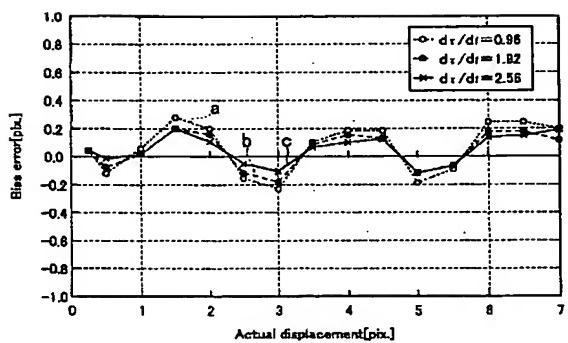
【図6】



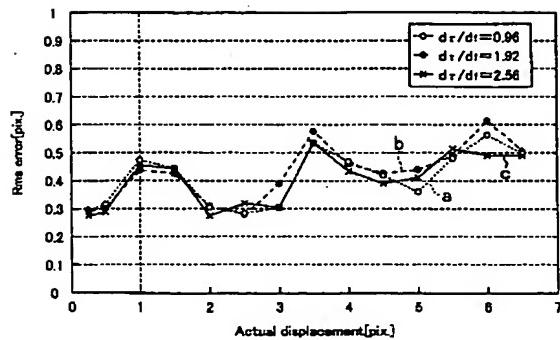
【図8】



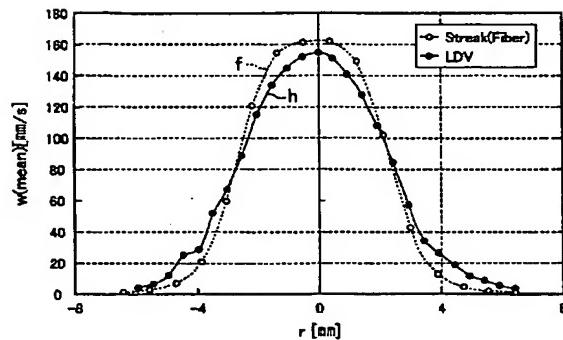
【図9】



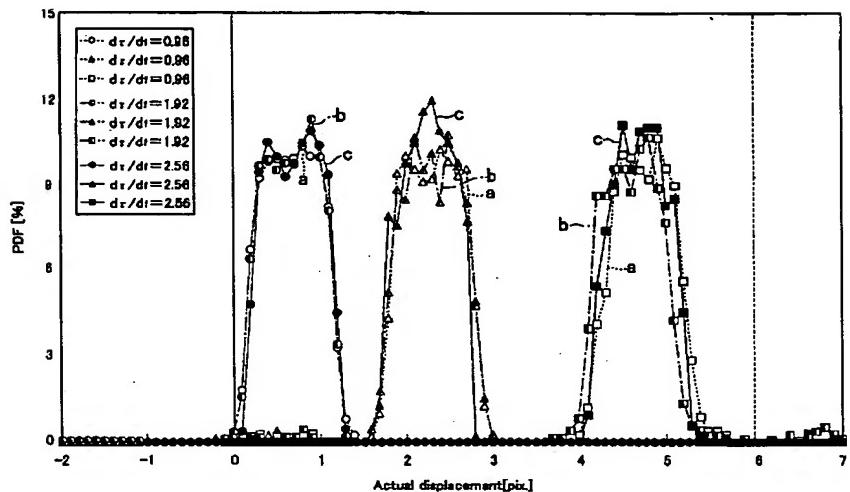
【図10】



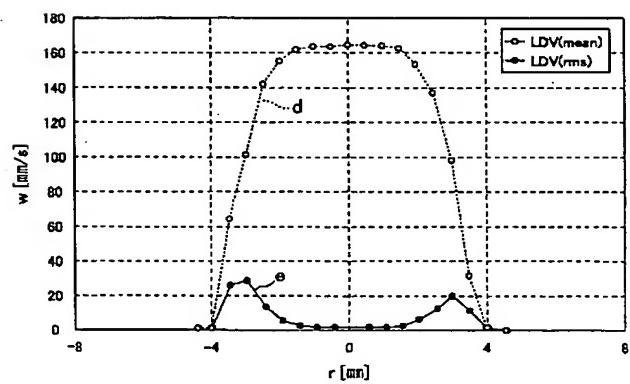
【図14】



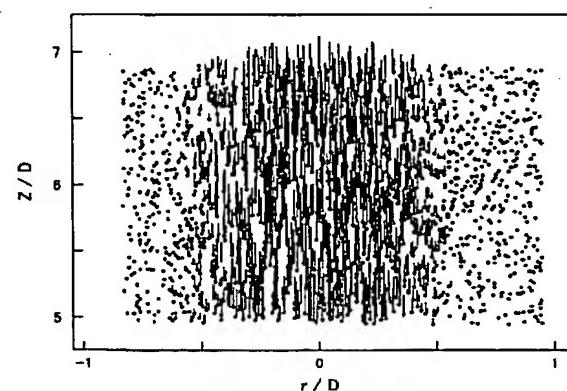
【図11】



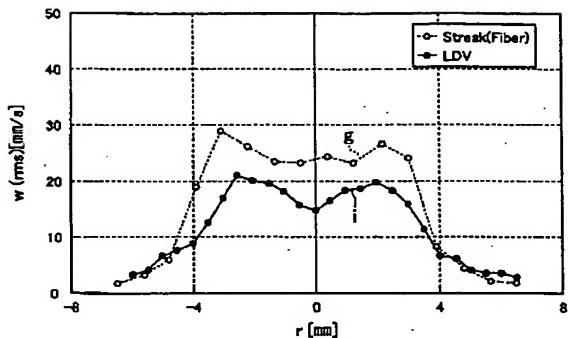
【図12】



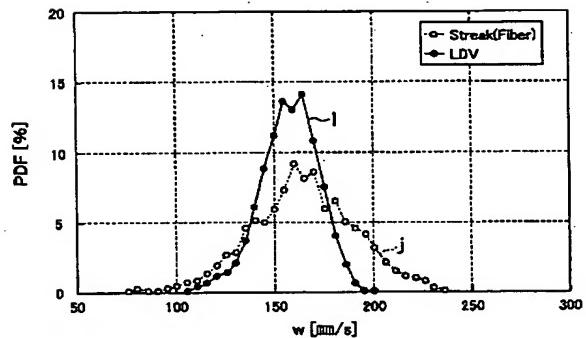
【図13】



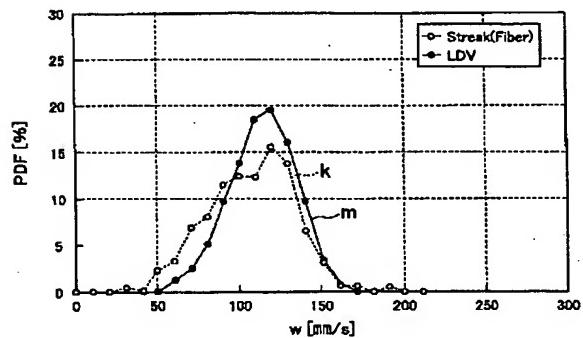
【図15】



【図16】



【図17】



## フロントページの続き

(72)発明者 手塚 英昭  
神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4番1号  
東京電力株式会社原子力研究所内  
(72)発明者 菊田 公一  
神奈川県横浜市港北区日吉三丁目14番1号  
慶應義塾大学理工学部内

(72)発明者 前田 昌信  
神奈川県横浜市港北区日吉三丁目14番1号  
慶應義塾大学理工学部内  
F ターム(参考) 2F034 AA01 AB01 AB02 AB05 DA01  
DA07 DA15 DB01 DB07 DB14

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- BLACK BORDERS**
- IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- FADED TEXT OR DRAWING**
- BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- SKEWED/SLANTED IMAGES**
- COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- GRAY SCALE DOCUMENTS**
- LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**